INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Geocronologia e Caracterização Elementar (U, ^{226}Ra , ^{210}Pb , Mn, Mo, Ni e Zn)
de perfis sedimentares do Planalto de Poços de Caldas - MG**

HELEINE CARDOSO DE ALMEIDA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientadora:
Profa. Dra. Barbara Paci Mazzilli

São Paulo
2019

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Geocronologia e Caracterização Elemental (U, ^{226}Ra , ^{210}Pb , Mn, Mo, Ni e Zn)
de perfis sedimentares do Planalto de Poços de Caldas - MG**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

HELEINE CARDOSO DE ALMEIDA

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Barbara Paci Mazzilli**

**São Paulo
2019**

Fonte de Financiamento: Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

ALMEIDA, H. C. ***Geocronologia e Caracterização Elementar (U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, Mn, Mo, Ni e Zn) de perfis sedimentares do Planalto de Poços de Caldas - MG***. 2019. 99 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Almeida, Heleine Cardoso
Geocronologia e Caracterização Elementar (U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, Mn, Mo, Ni e Zn) de perfis sedimentares do Planalto de Poços de Caldas - MG / Heleine Cardoso Almeida; orientador Barbara Paci Mazzilli. -- São Paulo, 2019.
99 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Geocronologia. 2. Sedimentos. 3. Ra - ²²⁶. 4. Pb - ²¹⁰.
I. Paci Mazzilli, Barbara, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO**HELEINE CARDOSO DE ALMEIDA****GEOCRONOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO ELEMENTAR (U, ^{226}Ra , ^{210}Pb ,
Mn, Mo, Ni e Zn) DE PERFIS SEDIMENTARES DO PLANALTO DE POÇOS
DE CALDAS – MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 28/06/2019

Banca Examinadora

Prof. Dr^a.: Barbara Paci Mazzilli

Instituição: _____ Julgamento _____

Prof. Dr^a.: Vanusa Maria Delage Feliciano

Instituição: _____ Julgamento _____

Prof. Dr^a.: Andreza Portella Ribeiro

Instituição: _____ Julgamento _____

**Dedico esse trabalho a minha família, meus amigos
e principalmente aos que falaram
que eu não conseguiria.**

AGRADECIMENTOS

Agradecer sempre me foi uma tarefa difícil que tive de aprender no decorrer da minha jornada do mestrado e certamente levarei esse ensinamento comigo pela vida. Deixo aqui com profundo respeito, meus agradecimentos à:

Todo o corpo e equipe técnica do Laboratório de Poços de Caldas – LAPOC/CNEN, que disponibilizaram toda a infraestrutura para a realização desse trabalho acadêmico. Agradeço aos laboratórios de Radiometria e Radioquímica e Química Analítica e seu diretor Dr. Rodrigo Bonifácio, e principalmente ao Marcelo Tarquínio pelas lições e bom humor; Giovani Bergamini pelas instruções e paciência; Dona Zé e Magda pelos chás e risadas e ao Flávio Tutancâmon por aturar minhas mudanças de humor.

Agradeço ao laboratório de Radônio e seu diretor, Dr. Nivaldo Carlos, pelo conhecimento adquirido e pela orientação no laboratório e trabalho de campo; Antônio Ídolo por sempre manter sua palavra e Danila Dias pela sororidade e incentivo.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN e a Secretaria de Formação Especializada - SEFESP pela concessão da bolsa de mestrado, pela qual foi possível a realização desse trabalho. Ao corpo docente e equipe técnica do Laboratório de Radiometria Ambiental, que me orientaram e acolheram. Agradeço a minha orientadora Dr^a. Barbara Mazzilli pelo conhecimento e exemplo; Dr. Marcelo Bessa pelos conselhos e estórias; André Rodrigo por me auxiliar nos campos da incerteza; e aos amigos de jornada Guilherme Lima, Graziela Mendonça, Gabriel Ferreira, Gleyka de Jesus, Letícia Lavieri e Andressa Nery, Laíssa Bonifácio e Ricardo Smith pelas risadas, almoços, cafés e congressos.

À minha mãe Dalva Almeida, pelo encorajamento, suporte físico e por sempre acreditar que eu seria capaz. Em memória de meu pai, Heraldo de Almeida, que partiu antes que pudesse ver sua filha caçula (e ovelha negra) com título de mestre.

Ao meu companheiro Wagner Galesco, pelo seu exemplo de humanidade e inspiração, e pelo suporte físico e emocional nos momentos decisivos dessa dissertação.

Aos meus amigos Gustavo Ferreira, Roberto Thomazini, Elaine Fedelli, Natália Andrade, Rejane Satori, Ewander Peres e Mychelle Rosa, por sempre torcerem por mim, mesmo longe.

À “mãe Lurdinha”, minha religião e aos meus orixás, que sempre me orientaram e ampararam nos momentos de dúvida e desespero.

“A sabedoria é filha da experiência”.

Leonardo Da Vinci

RESUMO

ALMEIDA, H. C. **“Geocronologia e Caracterização Elementar (U, ^{226}Ra , ^{210}Pb , Mn, Mo, Ni e Zn) de perfis sedimentares do planalto de Poços de Caldas – MG”**. 2019. 98 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

O Planalto de Poços de Caldas, localizado a sudoeste de Minas Gerais, é exemplo da maior intrusão alcalina ocorrida no Brasil, formada por processos de vulcanismo e intemperismo, ocorridos há cerca de 60-80 milhões de anos. Estes processos foram responsáveis pela formação de mineralizações de zircônio e molibdênio e diversas anomalias radioativas. Mais recentemente, a presença na região de várias fontes antrópicas, dentre elas o beneficiamento de urânio da Indústrias Nucleares Brasileiras – Caldas, contribuíram para a inserção de vários elementos nos corpos d'água da bacia do Ribeirão das Antas. O objetivo principal deste estudo foi fazer uso de perfis sedimentares e taxas de sedimentação para reconstituir historicamente a inserção de radionuclídeos e possíveis contaminantes na represa Bortolan e Poço Fundo ao longo dos anos. Nesses perfis foram determinados os teores dos radionuclídeos naturais U, ^{226}Ra e ^{210}Pb e dos elementos Mn, Mo, Ni, Zn e P por meio das técnicas de espectrometria gama, espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP- AES) e espectrofotometria. A taxa de sedimentação e a idade dos perfis foram avaliadas utilizando-se o modelo *Constant Rate of Supply*. Verificou-se que a utilização do modelo *Constant Rate of Supply* para a determinação das idades dos perfis forneceu resultados satisfatórios e da mesma ordem da grandeza das idades reais das represas Bortolan e Poço Fundo, 60 anos e 67 anos, respectivamente. Os valores obtidos para a taxa de sedimentação foram maiores para a represa Bortolan, devido ao assoreamento da represa, à urbanização e ocupação extensiva do solo para fins agrícolas e industriais. Analisando os resultados obtidos para a concentração dos elementos U, ^{226}Ra , ^{210}Pb , Mn, Mo, Ni, P e Zn, pode-se afirmar que os elementos que apresentaram contribuições antrópicas na represa Bortolan são o Mn, P e Zn. As maiores concentrações obtidas foram encontradas nas secções superficiais, indicando

que o maior aporte ocorreu mais recentemente, a partir do ano de 1997. Os resultados obtidos para U e Ni não variaram ao longo dos perfis e são da mesma ordem de grandeza de dados da literatura para a mesma represa, indicando que esses valores podem ser considerados como níveis basais da região. Em particular, os resultados de concentração de U para a represa Bortolan foram elevados, visto que a região do planalto de Poços de Caldas é caracterizada por ser uma anomalia radioativa. O Mo não apresentou variação significativa ao longo dos perfis da represa Bortolan e sua concentração média também é da mesma ordem de grandeza do valor médio mundial para solo. Portanto, para esse elemento não foi verificado um aporte antrópico. Para os resultados de concentração dos elementos analisados no perfil da represa de Poço Fundo, pode-se afirmar que todos são próximos das concentrações médias mundiais e inferiores aos resultados obtidos na represa Bortolan.

Palavras chave: geocronologia, sedimentos, radionuclídeos naturais,
caracterização elementar.

ABSTRACT

ALMEIDA, H. C. “**Geochronology and Elemental Characterization (U, ^{226}Ra , ^{210}Pb , Mn, Mo, Ni and Zn) of sediment profiles of Poços de Caldas Plateau - MG**”. 2019. 98 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

The Poços de Caldas Plateau, located in the southwest of Minas Gerais, is the greatest intrusion that occurred in Brazil, formed by processes of volcanism and weathering, which occurred about 60-80 million years ago. These processes were responsible by the formation of zirconium and molybdenum mineralizations and various radioactive anomalies. More recently, the presence in the region of several anthropogenic sources, amongst them, the uranium mining from Industrias Nucleares Brasileiras - Caldas, contributed to the entry of several natural radionuclides in the water bodies of Ribeirão das Antas. The aim of this study was to use sediment profiles and sedimentation rates to reconstruct the insertion of radionuclides and possible contaminants in the Bortolan and Poço Fundo dams over the years. In these profiles, the concentration of the natural radionuclides U, ^{226}Ra and ^{210}Pb , and the Mn, Mo, Ni, Zn and P elements were determined by Gamma Spectrometry, Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry and Spectrophotometry. The sedimentation rate and age of the profiles were evaluated using the *Constant Rate of Supply* model. It was verified that the use of the *Constant Rate of Supply* model to determine the ages of the sediment profiles gave satisfactory results, of the same order of magnitude of the real ages of the Bortolan and Poço Fundo dams, 60 years and 67 years, respectively. The values obtained for the sedimentation rate were higher for the Bortolan dam, due to silting of the dam, urbanization and extensive land occupation for agricultural and industrial activities. The results obtained for the concentration of the analyzed elements showed that Mn, P and Zn presented anthropogenic contributions in the Bortolan dam. The highest concentrations obtained were found in the superficial sections, indicating that the largest contribution occurred more recently, from the year of 1997 until now. The results obtained for U and Ni did not vary along the profiles and are of the same order of magnitude of literature

data for sediments of Bortolan dam, indicating that these values can be considered as the base line for the region. In particular, the results of U concentration for the sediments of Bortolan dam were higher than natural background, since the region of Poços de Caldas plateau is characterized by a radioactive anomaly. The Mo did not present significant variation along the profiles of the Bortolan dam and its average concentration is also of the same order of magnitude of the world average value for soil. Therefore, for this element an anthropogenic contribution was not verified. The results obtained for the concentration of the elements analyzed in the Poço Fundo dam profile are of the same order of magnitude as the world average value for soil and lower than the results obtained in the Bortolan dam sediment profile.

Keywords: geochronology, sediments, natural radionuclides, elemental characterization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	16 p.
Figura 1.2	18 p.
Figura 1.3	21 p.
Figura 1.4	22 p.
Figura 1.5	24 p.
Figura 1.6	25 p.
Figura 1.7	26 p.
Figura 3.1	28 p.
Figura 3.2	29 p.
Figura 3.3	30 p.
Figura 3.4	31 p.
Figura 3.5	32 p.
Figura 3.6	33 p.
Figura 3.7	35 p.
Figura 3.8	36 p.
Figura 3.9	38 p.
Figura 3.10	39 p.
Figura 3.11	41 p.
Figura 3.12	42 p.
Figura 3.13	43 p.
Figura 4.1	53 p.
Figura 4.2	57 p.
Figura 4.3	58 p.
Figura 4.4	59 p.
Figura 4.5	59 p.
Figura 4.6	63 p.
Figura 4.7	64 p.
Figura 4.8	65 p.
Figura 4.9	65 p.
Figura 4.10	69 p.
Figura 4.11	70 p.
Figura 4.12	70 p.
Figura 4.13	71 p.

Figura 4.14	74 p.
Figura 4.15	75 p.
Figura 4.16	76 p.
Figura 4.17	76 p.
Figura 4.18	80 p.
Figura 4.19	81 p.
Figura 4.20	81 p.
Figura 4.21	82 p.
Figura 4.22	87 p.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	24 p.
Tabela 3.1	32 p.
Tabela 4.1	50 p.
Tabela 4.2	51 p.
Tabela 4.3	56 p.
Tabela 4.4	60 p.
Tabela 4.5	61 p.
Tabela 4.6	62 p.
Tabela 4.7	66 p.
Tabela 4.8	67 p.
Tabela 4.9	68 p.
Tabela 4.10	72 p.
Tabela 4.11	72 p.
Tabela 4.12	73 p.
Tabela 4.13	77 p.
Tabela 4.14	78 p.
Tabela 4.15	79 p.
Tabela 4.16	83 p.
Tabela 4.17	83 p.
Tabela 4.18	85 p.
Tabela 4.19	86 p.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15 p.
1.1 Geocronologia de perfis sedimentares.....	17 p.
1.2 Área de estudo	19 p.
1.2.1 Planalto de Poços de Caldas - MG	19 p.
1.2.2 Represa Bortolan	24 p.
1.2.3 Represa da Fazenda Terra Nova	24 p.
1.2.4 Represa Poço Fundo.....	25 p.
1.3 Justificativa	26 p.
2 OBJETIVOS.....	27 p.
3 METODOLOGIA	28 p.
3.1 Coleta das amostras	28 p.
3.2 Pré-tratamento do sedimento.....	32 p.
3.3 Metodologia para determinação dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb e elementos Mn, Mo, Ni, Zn, P e U	33 p.
3.3.1 Determinação de ^{226}Ra e ^{210}Pb por espectrometria gama.....	33 p.
3.3.2 Determinação de Mn, Mo, Ni e Zn por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP – AES).....	37 p.
3.3.3 Determinação de P e U por espectrofotometria óptica.....	39 p.
3.3.3.1 Determinação de fósforo (disponível) utilizando azul de molibdênio por espectrofotometria óptica.....	40 p.
3.3.3.2 Determinação de U utilizando arsenazo (III) por espectrofotometria óptica	42 p.
3.4 Aplicação do modelo CRS para a datação dos perfis sedimentares	44 p.
3.4.1 Determinação da umidade.....	46 p.
3.4.2 Determinação da densidade real.....	47 p.
3.4.3 Determinação da massa total de sólidos e massa acumulada	47 p.
3.4.4 Determinação da profundidade corrigida.....	48 p.
3.4.5 Determinação da taxa e velocidade de sedimentação.....	48 p.
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49 p.
4.1 Caracterização de ^{226}Ra e ^{210}Pb nos perfis estudados	49 p.
4.2 Determinação da taxa e velocidade de sedimentação e datação dos perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I”, “Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II”	55 p.
4.2.1 “Bortolan/CBAII”	56 p.

4.2.2 “Bortolan I”	61 p.
4.2.3 “Campestre”	67 p.
4.2.4 “Campestre I”	73 p.
4.2.5 “Campestre II”	78 p.
4.3 Caracterização dos elementos U, Mn, Mo, Ni, Zn e P (disponível) nos perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I” e “Campestre II”	84 p.
5 CONCLUSÕES	92 p.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94 p.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, os corpos hídricos sempre foram chamarizes para o estabelecimento da população humana e a introdução de atividades antrópicas. Os ecossistemas aquáticos, em particular os lacustres e os microrganismos ali viventes, possuem grande capacidade de adaptação mesmo após longos períodos de adição de contaminantes químicos e perturbação advindos dessas atividades.

O crescimento populacional e urbanização após o século 20 cresceram nas mesmas proporções que a exploração do entorno dos ecossistemas aquáticos. As práticas de agricultura, mineração e despejos domésticos, vêm acrescentar à sedimentação já existente nos ecossistemas aquáticos, detritos que carregam materiais provenientes de outros elementos, que podem vir a se tornar elementos contaminantes em uma região (GODOY, 2012).

Somado aos sedimentos provenientes das atividades antrópicas, outras particularidades exercem influência na sedimentação dos ecossistemas aquáticos, tais como a conformação do curso d'água e variação hidrológica, que afetam diretamente a dinâmica das partículas de sedimento no corpo d'água. As partículas mais pesadas como as areias, perdem energia e logo sofrem deposição; as partículas mais finas (silte e argila) levam mais tempo para se depositar, sendo arrastadas por mais tempo no ambiente aquático (Figura 1.1).

Em uma coluna d'água, os elementos químicos possuem preferência de ligação às partículas finas do sedimento, visto que possuem preferência de ligação através da atuação da força eletrostática que se caracteriza pela área de superfície maior por unidade de massa em relação às partículas maiores, como as areias. As partículas de sedimento sofrem então ações de adsorção ("scavenging") ou dessorção, que são desencadeadas por fatores como a solubilidade do elemento, pH, condições de oxidação e redução, e constituinte mineral (DAMATTO, 2010; WANDERLEY, 2013).

O estudo de ecossistemas aquáticos torna-se de interesse efetivo, pois através dos sedimentos de um corpo hídrico podem ser estabelecidos modelos para analisar acontecimentos atuais, indicados pelos sedimentos mais recentes, e o passado, indicados pelos sedimentos mais profundos. Através

disso pode-se estabelecer estratégias de monitoramento para reconstituir a história das atividades antrópicas por meio da determinação dos elementos químicos, gerenciando e prevendo problemas futuros. Dentre esses elementos químicos, os metais pesados devem receber atenção especial, pois não são naturalmente degradados e tornam – se biodisponíveis através de alterações físico-químicas, acabando por não se fixarem ao sedimento e retornando à coluna d'água (SALOMONS, 1984; DIAS, 2007).

Figura 1.1: Transporte de contaminantes entre diferentes compartimentos ambientais

Fonte: Dias (2007)

Por se tratarem de arquivos naturais, os elementos químicos inseridos nos sedimentos de lagos, podem ser utilizados em uma ampla variedade de programas ambientais, como por exemplo, em determinações de alteração de taxa de erosão em bacias hidrográficas que surgem de distúrbios como aflorestamento, desmatamento, mudanças nas práticas de agricultura ou para monitorar a contaminação causada por metais pesados, contaminantes orgânicos e outros (APPELBY, 2001).

Os perfis sedimentares constituem uma excelente ferramenta para monitorar a qualidade dos corpos hídricos pois permitem a comparação das concentrações dos elementos dos sedimentos superficiais (as camadas

superiores e mais recentes do sedimento) com os sedimentos mais antigos, desde a época de formação do reservatório. Em analogia, a análise em perfil sedimentar representa uma série de fotografias sequenciais que formam uma filmagem dos acontecimentos desde o início da operação do reservatório. Claramente, isso só será possível se a deposição cronológica for preservada (SABESP, 2015; SILVA, 2013 FERREIRA, 2014).

1.1 Geocronologia de perfis sedimentares

Uma das técnicas que utiliza perfis sedimentares para a avaliação de possíveis poluentes ambientais em corpos d'água é denominada como geocronologia de sedimentos ou datação. Essa técnica consiste no seccionamento desses perfis amostrais coletados do corpo hídrico, e emprega radionuclídeos como traçadores ambientais adsorvidos nos sedimentos, através de um modelo matemático, calcula a época em que aquela secção de sedimento foi depositada.

Havendo a determinação da idade de cada secção sedimentar e comparando com dados de análises químicas, pode – se inferir a época em que um elemento foi incorporado ao sedimento e verifica – se se esse elemento é oriundo da litologia da região ou se ele é de origem antrópica, a partir da presença ou não desse elemento ao longo do tempo.

Os radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb utilizados como traçadores para a datação desse estudo, são advindos do decaimento da série radioativa natural de ^{238}U , sendo que o ^{210}Pb , com meia vida de 22,3 anos, pode datar até cerca de 100 anos. Citando Simms *et al.* (2008): “O ^{210}Pb contido no solo e nas rochas produzido *in situ* pelo decaimento do ^{226}Ra é referido como ^{210}Pb “suportado”, porque está em equilíbrio com seu precursor. Entretanto, com a difusão de uma pequena parcela do radionuclídeo intermediário ^{222}Rn do solo para a atmosfera e subsequente “fallout” do aerossol com o ^{210}Pb associado, ocorre deposição do material particulado na superfície do solo. Esse “fallout” de ^{210}Pb é comumente denominado ^{210}Pb “não suportado” ou “atmosférico” por que não está em equilíbrio no solo com o ^{226}Ra (SIMMS *et al.*, 2008, pag 1112)”. A figura 1.2 exemplifica esse processo.

Figura 1.2: Princípios da Datação com ^{210}Pb

Fonte: Dias (2007)

O modelo de datação escolhido foi o *Constant Rate of Supply* (CRS) criado por Appleby & Oldfield (1978) e Robbins (1978), que utiliza a variação da concentração entre os radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb , denominado $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ para calcular a idade de cada secção do perfil sedimentar. Robbins (1978), afirma que principal fonte de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ na atmosfera é proveniente da emissão de ^{222}Rn das massas continentais.

O conhecimento da taxa de acumulação dos radionuclídeos em ambientes lacustres durante os últimos 100 anos é de fundamental importância no entendimento de processos geoquímicos sedimentários e aquáticos. Em geral a interpretação de perfis químicos de sedimentos superficiais é limitada pela ausência do conhecimento das taxas de sedimentação (DAMATTO, 2010).

Calcula-se as taxas de acumulação a partir da variação da concentração de ^{210}Pb ao longo do perfil sedimentar, sendo o decréscimo da atividade do ^{210}Pb em função da profundidade, um indicativo sobre a taxa de acumulação dos sedimentos no local analisado e a sua relação com fatores exógenos (FERREIRA, 2012).

1.2 Área de estudo

1.2.1 Planalto de Poços de Caldas – MG

O planalto de Poços de Caldas, localizado a sudoeste de Minas Gerais, é exemplo da maior intrusão alcalina ocorrida no Brasil, formada por processos de vulcanismo e intemperismo, ocorridos há cerca de 60-80 milhões de anos. Estes processos são responsáveis pela formação de mineralizações (zircônio e molibdênio), jazidas de bauxita, argilas refratárias e diversas anomalias radioativas e elementos de terras raras (POÇOS DE CALDAS PROJECT, 1990; ALBERTI, 2008)

Como pode ser visto na figura 1.3, o planalto tem aproximadamente forma circular e diâmetro de 35 km e área de aproximadamente 800 km², com altitudes que variam de 1300 a 1600 metros e é caracterizado por grandes depressões vulcânicas denominadas caldeiras, que possuem alta radiação de fundo natural e uma ampla variação mineralógica e granulométrica (ALBERTI, 2008; ALMEIDA, 2017).

O clima da área é marcado pela estação seca de maio a outubro e estação chuvosa de novembro a abril. Na estação seca, os rios, efêmeros, tendem a secar uma vez que são alimentados por um fluxo menor. Na estação chuvosa eles exibem enchentes rápidas alimentadas pela alta intensidade das chuvas, causando inundações, provendo também recargas do lençol freático (POÇOS DE CALDAS PROJECT, 1990).

A região possui duas bacias hidrográficas: a bacia do ribeirão das Antas, que ocupa 70% da área total do planalto de Poços de Caldas, e a bacia do rio Verde, ambas afluentes do rio Pardo, inseridas na Bacia do rio Grande, afluente do rio Paraná (ALBERTI, 2008).

Sendo a água um chamariz para a introdução de atividades antrópicas e fundamentando-se na grande extensão da bacia do ribeirão das Antas ao longo do planalto de Poços de Caldas, tornaram-se propícias as instalações de indústrias e atividades agrícolas e pecuárias no seu entorno.

Moreira (2017), baseando-se em mapas obtidos pelo Google Earth Pro® e processadas pelo software ArcGIS®, classifica a composição do uso do solo da bacia do ribeirão das Antas da seguinte forma:

- Campo Pastagem: 40,35%
- Mata: 22,90%
- Cultiva de eucalipto: 15,04%
- Agricultura: 11,40%
- Solo exposto: 5,42%
- Área urbana: 2,64%
- Água: 2,25%

Moreira (2017) ainda destaca que as estruturas geológicas da bacia hidrográfica do Ribeirão das Antas são predominantemente constituídas de tinguaitos (28,9%) e fonolitos (27,75%) e foiaítos(14,73%), todas de proveniência vulcânica e composições químicas semelhantes. Esse autor também salienta a presença de rochas potássicas (27,04%), tufo-rocha piroclástica (1,54%) e de fenitos e gnaisses (0,03%).

Pertencente à bacia de mesmo nome, o ribeirão das Antas, que tem sua nascente situada em Andradas – MG e ocupa uma área de cerca de 455 km², ingressa no planalto de Poços de Caldas – MG pela borda sul a 1640m de altitude e percorre 62 km (ALBERTI, 2008). Ao longo de seu percurso até ser barrado pela represa Bortolan, estão localizadas algumas fontes de atividades antrópicas, principalmente em decorrência da grande variedade mineralógica dessa bacia. Pode-se destacar que nessa área há o beneficiamento de minério de bauxita (que gera rejeitos de sílica e óxido de ferro) que atualmente é uma das mais importantes indústrias locais e empreendida pela Alcoa SA e a Companhia Brasileira de Alumínio – CBA (TINOCO, 2017). Há também o beneficiamento de zircônio (gerando rejeitos contendo Mn), argila e manganês, estes, que são utilizados nos setores de fundição, refratários e cerâmica da indústria Togni SA Materiais Refratários (figura 1.3) (SILVA, 2001; SECRETARIA MUNICIPAL DE TURISMO E CULTURA DE POÇOS DE CALDAS, 2013; LOBATO, 2009).

Aponta-se também que nos entornos da área do ribeirão das Antas há a produção de fertilizantes pela indústria Yoorin Fertilizantes da multinacional japonesa Mitsui, que foi mais recentemente adquirida pela Mineradora Curimbaba, mas que atua na região desde a década de 60. Estudos enfatizam

a qualidade da água e dos sedimentos da bacia do ribeirão das Antas, sendo que a introdução de fosfatos e nitratos (elementos primários em fertilizantes) causam a poluição de rios e córregos e desequilíbrio ecológico de algas e organismos, que consomem o oxigênio dissolvido contido na água (ALBERTI, 2008; COMISSÃO DAS ÁGUAS, 2012).

Somando às práticas descritas, também há na região o grupo M&G Fibras Brasil que produzia matéria prima para garrafas PET e encerrou suas atividades na região em 2018, e acrescenta-se a isso intenso uso da terra para fins agrícolas e pecuários.

Figura 1.3: Planalto de Poços de Caldas e percurso do ribeirão das Antas

Fonte: Google Earth

Contudo, uma das principais atividades que se sobressaíram nessa região foi o beneficiamento de urânio na mina Osamu Utsumi pela extinta Nuclebrás (Empresas Nucleares Brasileiras), que teve início na região na década de 1980 e foi considerada a primeira mina a céu aberto no Brasil. Suas instalações atendiam a demanda de Angra I e operaram até 1995, quando foram fechadas e seguem em estudo para descomissionamento até os dias atuais sob a supervisão das Indústrias Nucleares Brasileiras – INB, Caldas (POÇOS DE CALDAS PROJECT, 1990).

A Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM gerou o Inventário de Áreas Contaminadas de Minas Gerais (2018), que fornece informações sobre áreas afetadas por atividades antrópicas, que incluem o planalto de Poços de Caldas. Esse inventário também fornece um conjunto de informações sobre a ocorrência de materiais inorgânicos oriundos de atividades de mineração, de agricultura e despejos domésticos. O percentual de ocorrência de materiais inorgânicos é apresentado na figura 1.4.

Figura 1.4: Percentual de ocorrência de materiais inorgânicos em áreas contaminadas em Minas Gerais.

Fonte: FEAM (2018)

Em vista das atividades exercidas no planalto de Poços de Caldas, pode haver liberação de elementos potencialmente poluidores, que alteram a concentração total desses elementos em corpos d'água e sedimentos, e eventualmente causam impacto no meio ambiente receptor. Elementos provenientes de atividades de mineração, agricultura e despejos domésticos, tais como Mn, Mo, Ni, P, Zn e U merecem consideração, pois no relatório da Comissão das Águas (2012) é verificada a presença desses elementos nos

sedimentos superficiais do planalto. Os valores das concentrações de Mn, Mo, Ni, P, Zn e U para a represa Bortolan são apresentados na tabela 1.1, juntamente com os valores orientadores para solo (CONAMA, 2009) e as concentrações na crosta continental (WEDEPOHL, 1995).

Tabela 1.1: Valores das concentrações de Mn, Mo, Ni, P, Zn e U para sedimentos superficiais da represa Bortolan obtidos no relatório da Comissão das Águas (2012), valores orientadores para qualidade de solo da resolução CONAMA n°420 e valores médios da crosta continental de Wedepohl (1995)

	Local de coleta	Mn Sed. (mg kg ⁻¹)	Mo Sed. (mg kg ⁻¹)	Ni Sed. (mg kg ⁻¹)	P Sed. (mg kg ⁻¹)	Zn Sed. (mg kg ⁻¹)	U Sed. (mg kg ⁻¹)
Ponto 9	Ribeirão das Antas (a jusante da INB)	600 - 1200	5 - 110	9 - 28	300 - 1000	160 - 1520	20 - 70
Ponto 13	Ribeirão das Antas (a jusante da Alcoa)	800 - 1300	5 - 130	7 - 14	450 - 950	120 - 360	30 - 60
Ponto 14	Represa Bortolan (próximo a entrada do Rib. das Antas na barragem)	500 - 1500	5 - 430	7 - 13	450 - 1550	160 - 400	25 - 55
Ponto 15	Represa Bortolan (próximo a barragem)	1500 - 3900	5 - 490	7 - 35	750 - 1600	220 - 380	25 - 30
Ponto 16	Ribeirão das Antas (após a barragem)	500 - 18900	5 - 370	7 - 38	550 - 1450	40 - 240	10 - 15
Conama 420/2009	Valores orientadores de qualidade para solo	-	30	30	-	300	-
Wedepohl (1995)	Concentração dos elementos na crosta continental	716	1.1	56	757	65	1,7

Fonte: autor da dissertação

Os valores de concentração dos elementos Mn, Mo, Ni, P, Zn e U obtidos no relatório da Comissão das Águas (2012) (tabela 1.1) apresentam níveis significativos, acima dos níveis considerados basais para a crosta continental e para os valores orientadores de qualidade do solo (WEDEPOHL, 1995; CONAMA, 2009), com exceção do Ni. A presença desses elementos é um indicativo da contaminação da área por atividades antrópicas, corroborado pelos valores descritos no inventário da FEAM (2018).

Tendo em vista as expressivas variações obtidas nos intervalos de concentração dos elementos nos sedimentos superficiais, optou-se no presente trabalho em analisar esses elementos em perfis de sedimentos na represa Bortolan, para avaliar o comportamento dos elementos ao longo dos anos, verificar possíveis contaminações e definir os níveis basais da região.

1.2.2 Represa Bortolan

A represa Bortolan (Figura 1.5), pertencente a bacia do ribeirão das Antas, foi inaugurada em maio de 1956, para garantir o abastecimento das usinas pelo Departamento Municipal de Eletricidade – DME (DME, 2016). A barragem se estende por 3,45 km² e possui volume de 6,6 milhões de m³ é considerado um compartimento que poderá ser utilizado no futuro para o abastecimento público, assim, há o interesse de avaliar a variação da contaminação antrópica ao longo dos anos em perfis de sedimentos e estimar a taxa e velocidade de sedimentação por meio da determinação de ²²⁶Ra e ²¹⁰Pb e aplicação do modelo CRS.

A represa fica a margem da rodovia BR-267. Em sua margem esquerda oferece atividades à população do município de Poços de Caldas, tais como esportes náuticos, pesca esportiva e passeios turísticos, possuindo também clubes e restaurantes com estruturas para turistas. Na margem direita, podem ser vistos condomínios e chácaras.

Figura 1.5: Represa Bortolan

Fonte: autor da dissertação

1.2.3 Represa da Fazenda Terra Nova

A represa da Fazenda Terra Nova (Figura 1.6), formada por um dos afluentes da bacia do Ribeirão das Antas, localiza-se em uma região

essencialmente agrícola mais preservada e fora da área de influência das principais fontes poluidoras da região.

Figura 1.6: Represa da Fazenda Terra Nova

Fonte: autor da dissertação

1.2.4 Represa Poço Fundo

A represa Poço Fundo (Figura 1.7), faz divisa com diversos municípios, sendo um deles o município de Campestre. Essa represa situa-se no rio Machado, afluente do rio Verde e contribuinte do rio Grande, na região sul de Minas Gerais. A construção da barragem da Usina Hidrelétrica de Poço Fundo foi iniciada em 1945 e entrou em operação em 1949. Possuindo 120 m de extensão e altura de 6 m, o reservatório contém uma área de 3,22km² e volume total máximo de 4 milhões de metros cúbicos (CEMIG, 2006).

A represa Poço Fundo foi escolhida para a coleta dos perfis sedimentares por se localizar em uma área mais preservada e fora da influência das principais atividades antrópicas. Outro fato que justifica a escolha da represa Poço Fundo, é que essa se localiza fora do planalto de Poços de Caldas, apresentando radiação de fundo mais baixa e servindo como parâmetro de comparação para os radionuclídeos ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb e U.

Figura 1.7: Represa Poço Fundo

Fonte: autor da dissertação

1.3 Justificativa

A justificativa do presente trabalho levou em consideração a presença de várias atividades antrópicas na região, que apresentam potencial de aumentar o nível de elementos indesejáveis no sistema hídrico e o fato dos elementos Mn, Mo, Ni, P, Zn e U apresentarem resultados elevados, acima dos níveis considerados basais, nos sedimentos superficiais da bacia do Ribeirão das Antas e na represa Bortolan (relatório da Comissão das Águas, 2012). Sendo assim, um dos objetivos de presente trabalho foi a determinação da concentração desses elementos nos sedimentos superficiais e perfis sedimentares coletados na represa Bortolan, com o intuito de avaliar contaminações presentes e pretéritas. Como parâmetro de comparação foram analisados também os perfis coletados na represa da Fazenda Terra Nova e na represa Poço Fundo.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é reconstituir historicamente o enriquecimento dos radionuclídeos naturais e outros elementos químicos de interesse nos perfis sedimentares da represa Bortolan e da represa Poço Fundo, com o intuito de avaliar o potencial de contaminação e da represa Bortolan e os níveis basais da região.

Para lograr o objetivo do estudo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os teores dos radionuclídeos naturais ^{226}Ra , ^{210}Pb por espectrometria gama, nos perfis sedimentares.
- Determinar a taxa de sedimentação e a idade dos perfis.
- Quantificar os elementos Mn, Mo, Ni, Zn por ICP- AES e P e U por espectrofotometria óptica, nos perfis sedimentares.
- Correlacionar os dados e avaliar o grau de contaminação da represa Bortolan e definir os níveis basais da região.

3. METODOLOGIA

3.1 Determinação do local e coleta das amostras

Para a definição do local de amostragem dos perfis devem ser escolhidos pontos na região mais profunda do reservatório. Os locais de amostragem devem ser cuidadosamente selecionados, pois as coletas de perfis de sedimento são possíveis apenas em ambientes onde não ocorreu perturbação da coluna de sedimento como, por exemplo, dragagens.

A figura 3.1 revela o entorno da represa Bortolan, as indústrias Yoorin, M&G Fibras Brasil e a Companhia Brasileira de Alumínio – CBA. Também pode ser visto parte da zona agrícola e parte da malha urbana da cidade de Poços de Caldas. Os pontos de coleta dos 5 perfis sedimentares foram selecionados levando-se em consideração a localização das possíveis fontes poluidoras.

Figura 3.1: Represa Bortolan e pontos de coleta “Bortolan”, “Bortolan I”, “Bortolan CBA I” e “Bortolan CBA II”

Fonte: Google Earth

Podem ser vistos na figura 3.1 os pontos de coleta “Bortolan/CBA I” e “Bortolan CBA II”, que estão destacados em amarelo e foram selecionados por se situarem próximos à entrada do Ribeirão das Antas na represa Bortolan, a jusante das indústrias Yoorin Fertilizantes, da Companhia Brasileira de Alumínio – CBA e das Industrias Nucleares Brasileiras, INB – Caldas.

Os pontos de coleta dos perfis “Bortolan” (destacado em vermelho) e “Bortolan I” (destacado em laranja), foram selecionados por se situarem próximo à barragem da represa e à malha urbana e a jusante de campos com atividades agrícolas.

Na represa da Fazenda Terra nova, o ponto exato de coleta do perfil “Fazenda” localiza-se à margem direita da represa e foi selecionado pela facilidade de aproximação, pois está a montante da via de acesso que liga o local à área de cultivo. Seu entorno é marcado por intensa atividade agrícola, sendo inclusive utilizada para dessedentação de animais (figura 3.2). Nesta represa, foi coletado um perfil de sedimentos, destacado em roxo, denominado “Fazenda”, a montante do haras Centro Equestre Terra Nova – CETEN.

Figura 3.2: Represa da Fazenda Terra Nova e ponto de coleta “Fazenda”

Fonte: Google Earth

Os 3 perfis coletados na represa Poço Fundo se localizam próximo a barragem, onde o ponto “Campestre”, em destaque rosa, foi coletado próximo a margem esquerda e da área de cultivo e pastagem. Os pontos “Campestre I”, em destaque verde, e “Campestre II”, em destaque azul, são próximos à margem direita e em uma região mais preservada. Os pontos das coletas podem ser vistos na figura 3.3.

Figura 3.3: Represa Poço Fundo e pontos de coleta dos perfis “Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II”

Fonte: Google Earth

As coletas foram realizadas no período de dezembro de 2015 a abril de 2018, caracterizando o período chuvoso e início do período de seca. As coordenadas geográficas e suas respectivas datas de cada ponto de coleta são mostrados na tabela 3.1.

A metodologia utilizada na coleta dos perfis sedimentares foi baseada no procedimento descrito no Manual Técnico da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2001).

Tabela 3.1: Descrição dos Pontos de Coleta

Local	Data	Descrição dos pontos de coleta	Coordenadas Geográficas
Represa Bortolan (Poços de Caldas/MG)	15/12/2015	Bortolan - próximo a barragem	21° 47' 17.87" S 46° 38' 12.45" O
	24/05/2016	Bortolan CBA I - próximo a entrada do Rib. das Antas na rep. Bortolan	21° 49' 07.57" S 46° 38' 01.60" O
		Bortolan CBA II - próximo a entrada do Rib. das Antas na rep. Bortolan	21° 49' 07.59" S 46° 38' 01.61" O
	08/11/2017	Bortolan I - próximo a barragem	21° 47' 18.36" S 46° 38' 04.02" O
Represa da Fazenda Terra Nova (Poços de Caldas/MG)	11/02/2016	Fazenda - próximo a Fazenda Terra Nova - CETEN	21° 50' 10.59" S 46° 32' 16.94" O
Represa Poço Fundo (Campestre/MG)	21/03/2016	Campestre - próximo a barragem, margem esquerda	21° 48' 55.10" S 46° 07' 40.99" O
		Campestre I - próximo a barragem, margem direita	21° 48' 36.38" S 46° 07' 46.53" O
	05/04/2018	Campestre II - próximo a barragem, margem direita	21° 48' 37.01" S 46° 07' 46.17" O

Fonte: autor da dissertação

Foi escolhido o amostrador do tipo “core” de gravidade, que é utilizado para obter amostras de sedimento para caracterizações geológicas e datação. O modelo utilizado é caracterizado por um tubo de acrílico com 7,2cm de diâmetro, onde um pistão montado acima do tubo do amostrador é aberto e deixa a água passar pelo tubo durante a descida e fecha quando há penetração desse tubo no sedimento para prevenir que esse escorra pelo tubo durante a subida (figura 3.4).

Figura 3.4: Amostrador Gravitacional tipo “Core”

Fonte: autor da dissertação

A velocidade de descida dos amostradores deve ser controlada, principalmente durante a penetração inicial no sedimento, para evitar

perturbações na superfície e para minimizar a compressão devido à fricção das laterais do tubo do amostrador.

3.2 Pré-tratamento do sedimento

Após a coleta dos perfis verticais, estes foram levados até terra firme, onde foram posicionados para que uma extrusora acoplada a um êmbolo graduado em 0,25 cm, pudesse seccionar as amostras a cada 2 cm com a ajuda de um fatiador, exceto o perfil “Bortolan” que foi seccionado a cada 1 cm (Figura 3.5).

Essas amostras foram então alocadas em recipientes de alumínio (Figura 3.5), identificados e fechados para evitar a mínima perda por evaporação, sendo transportados o mais breve possível ao laboratório.

Figura 3.5: Seccionamento e armazenamento das amostras

Fonte: autor da dissertação

As amostras foram pesadas em balança semi-analítica e secadas até peso constante em estufa monitorada por termômetro calibrado, para evitar o aumento de temperatura e a volatilização de elementos mais voláteis como o fósforo.

O sedimento foi então desagregado com pistilo de porcelana e transferido para um moinho de almofariz e pulverizado por cerca de 15min,

sendo em seguida homogeneizado e acondicionado em sacos de polietileno devidamente identificados.

3.3 Metodologia para determinação dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb e elementos Mn, Mo, Ni, Zn, P e U

A metodologia que foi utilizada para determinação dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb e os elementos Mn, Mo, Ni, Zn, P e U nos sedimentos é apresentada resumidamente no fluxograma da figura 3.6.

Figura 3.6: Descrição da metodologia utilizada para determinação de radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb e os elementos Mn, Mo, Ni, Zn P e U

Fonte: autor da dissertação

3.3.1 Determinação de ^{226}Ra e ^{210}Pb por espectrometria gama

As amostras de sedimentos foram preparadas de acordo com o manual ASTM C999 – 05 (2010), sendo homogeneizadas com a ajuda de um moinho de almofariz Fritsch, modelo Pulverisette 2 e acondicionadas em placas de petri de poliestireno de 49x13mm. As placas foram seladas com clorofórmio para evitar perda do ^{222}Rn (que é um gás nobre que pode emanar facilmente) e

armazenadas por trinta dias. Esse tempo de armazenamento foi necessário para assegurar o equilíbrio radioativo entre o ^{226}Ra e seu produto de decaimento ^{214}Pb . As massas de sedimento seladas variaram de 12 a 18 g.

O procedimento utilizado para a determinação da atividade dos radionuclídeos por espectrometria gama foi baseado na metodologia de ASTM C1402 - 04 (2009) e ASTM D7784 – 12 (2013).

No presente trabalho, a espectrometria gama foi utilizada para a quantificação das atividades dos elementos ^{226}Ra e ^{210}Pb provenientes da série de decaimento do ^{238}U . A espectrometria gama é, atualmente, a técnica analítica mais utilizada para mensuração de processos de decaimento radioativo com emissão de raios gama. Destaca-se que as principais vantagens dessa metodologia são provenientes da discriminação das energias gama por um multicanal aliado ao detector e por essa razão não há necessidade de pré-tratamento químico ou pré-concentração das amostras. O desenvolvimento tecnológico de detectores semicondutores de Ge hiperpuro com alto poder de resolução permitiu detectar partículas gama em amostras que apresentam diversos elementos emissores gama e apresentam concentrações de atividade muito baixas, próximas à radiação natural.

Essencialmente, o radionuclídeo ^{226}Ra é um emissor de energia alfa, com isso, sua detecção pela espectrometria gama torna-se impossível. Um modo de conseguir mensurar o ^{226}Ra é por meio da determinação do seu produto de decaimento, o ^{214}Pb , que é um emissor beta e gama, que emite foto picos com energia de 295 e 352 keV no espectro gama.

Em contrapartida, o ^{210}Pb é um emissor de energias alfa, beta e gama, característica esta, que possibilita utilizar seu pico de emissão de energia gama de 46,5 keV.

No presente estudo, foram utilizados 3 detectores semicondutores de HPGe da CANBERRA coaxiais e cilíndricos, com blindagem de chumbo. Os espectros gama foram obtidos e analisados pelo software Genie™ 2000 de análise espectral, acoplados a analisadores multicanais da marca CANBERRA modelo INSPECTOR 2000, de detecção de 30 à 1500keV (figura 3.7).

O primeiro detector disponibilizado para a quantificação dos radionuclídeos possui eficiência relativa de 45% em relação ao fóton do ^{60}Co , porém não caracterizado, utilizando-se assim o método convencional da

construção da curva de eficiência por meio de um material de referência certificado, com concentração de atividade de ^{226}Ra e ^{210}Pb conhecidas (equação 3.1). O material de referência certificado utilizado foi o IAEA 447 – *moss soil*, da *International Atomic Energy Agency* – IAEA.

$$Ef = \frac{\text{Área} - BG}{m.t.c.I\gamma} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

Ef: eficiência de contagem para a energia de transição gama considerada (cps dps^{-1});

Área: área líquida do pico da transição gama considerada (contagem);

BG: área líquida da radiação de fundo para a transição gama considerada (contagem);

m: massa da amostra (kg);

t: tempo de contagem (s);

C: concentração do radionuclídeo na amostra (Bq kg^{-1});

$I\gamma$: intensidade absoluta da transição gama considerada (%).

Figura 3.7: Detectores semicondutores HPGe utilizados

(Fonte: autor da dissertação)

Os outros dois detectores possuem eficiência relativa de 20% em relação ao fóton do ^{60}Co , e são considerados “caracterizados de fábrica”, que permitem a construção da curva de eficiência por simulação numérica, utilizando o software Canberra Labsocs.

O software Canberra Labsocs disponibiliza as eficiências do detector semicondutor de HPGe, visto que essas eficiências já foram determinadas através do mapeamento da superfície do detector por uma fonte, e pode construir uma curva de eficiência por meio de um modelo matemático e simulação numérica a partir de dados previamente fornecidos tais como geometria e espessura da amostra, distância entre a amostra e o detector de HPGe, densidade e composição mineralógica do sedimento. Para a validação da curva de eficiência obtida, foram medidos 5 materiais de referência disponibilizados pela IAEA. Os materiais de referência utilizados foram: IAEA 447 – *moss soil*, contendo o radionuclídeo de interesse ^{210}Pb ; IAEA 434 – *phosphogypsum*, contendo os radionuclídeos de interesse ^{210}Pb e ^{226}Ra ; IAEA 312 – *soil*; IAEA 313 – *stream sediment* e IAEA 314 – *stream sediment*, esses três últimos, contendo o radionuclídeo de interesse ^{226}Ra (figura 3.8)

Figura 3.8: Materiais de referência utilizados para a validação da curva de eficiência dos detectores de HPGe

Fonte: autor da dissertação

Após a contagem e análise dos espectros obtidos para os materiais de referência, os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os valores certificados e verificou-se que os valores não diferem significativamente, num nível de confiança de 95%.

As concentrações de ^{226}Ra e ^{210}Pb nas amostras analisadas foram obtidas utilizando-se a equação 3.2:

$$C = \frac{\text{Área} - BG}{m \cdot t \cdot Ef \cdot I\gamma} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

C: concentração do radionuclídeo na amostra (Bq kg^{-1});

Área: área líquida do pico da transição gama considerada (contagem);

BG: área líquida da radiação de fundo para a transição gama considerada (contagem);

m: massa da amostra (kg);

t: tempo de contagem (s);

Ef: eficiência de contagem para a energia de transição gama considerada (cps dps^{-1});

$I\gamma$: intensidade absoluta da transição gama considerada (%).

O tempo de contagem das amostras variou de 28800s a 201600s.

Para assegurar o controle de qualidade dos detectores gama utilizados, os Laboratórios de Radiometria do Laboratório de Poços de Caldas – CNEN participam três vezes por ano do Programa Nacional de Intercomparação – PNI de resultados, oferecido pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria IRD – CNEN e dos testes de proficiência oferecidos pelo programa Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity – ALMERA da IAEA.

3.3.2 Determinação de Mn, Mo, Ni e Zn por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP – AES)

Para a análise dos elementos Mn, Mo, Ni e Zn, por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP – AES), uma

alíquota das amostras de sedimentos passou por uma digestão química para abertura parcial em forno de micro-ondas (Ethos 1 – Advanced Microwave Digestion System), que é apresentada na figura 3.9. O procedimento utilizado para a abertura das amostras se baseia no método descrito pela EPA (SW 846 EPA 3051^a, 2007). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Química Analítica do Laboratório de Poços de Caldas – CNEN.

Figura 3.9: Abertura parcial de amostras em forno de micro-ondas

Fonte: autor da dissertação

A digestão química parcial foi feita por meio da adição de ácido nítrico concentrado em vasos de teflon. As amostras foram aquecidas em forno de micro-ondas durante uma hora, com rampa de aquecimento em intervalos de 10 minutos até atingir 175°C. Os vasos de teflon foram abertos após 24 h e seu conteúdo foi filtrado por filtros de papel faixa branca (figura 3.10). As amostras filtradas foram recolhidas, avolumadas com água destilada e identificadas. Após a digestão química parcial, as análises de Mn, Mo, Ni e Zn foram realizadas por ICP – AES, utilizando-se a metodologia descrita pela EPA (SW 846 EPA 6010c, 2007).

A calibração do ICP - AES para os elementos de interesse é feita a partir de uma curva de calibração, utilizando soluções de concentração conhecida denominadas de Soluções de Verificação de Calibração (CCV) contendo Al, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Mn, Mo, Pb e V, e Solução de Padrão Interno de Sc. Para o controle de qualidade durante a análise, são preparadas soluções

denominadas Soluções Lower Limit Calibration Continuous Verification (LLCCV) contendo Cr, Ni, Cu, Zn, Mn, Pb.

Figura 3.10: Filtragem da amostra após abertura parcial

Fonte: autor da dissertação

A metodologia de análise por ICP – AES consiste em determinações multielementares baseadas em sistemas ópticos sequenciais ou simultâneos e uma fonte axial ou radial de plasma de argônio. Para isso, o instrumento mensura espectros de emissão gerados pela nebulização de amostras, que se transformam em aerossol, e são transportados para a tocha de plasma indutivo (EPA, 2000). As altas temperaturas do plasma indutivo dissociam as moléculas da amostra e excitam os átomos e íons livres no estado gasoso, emitindo radiação eletromagnética causada pelo retorno das espécies excitadas ao seu estado fundamental. Esse comportamento gera espectros de emissão com picos específicos de cada elemento, que são captados por dispositivos fotossensíveis, enviados e analisados pelo *software* ICP EXPERT (GINÉ, 1998; RIBEIRO, 2006).

3.3.3 Determinação de P e U por espectrofotometria óptica

O princípio da análise por espectrofotometria óptica consiste na utilização de uma fonte para a emissão de radiação eletromagnética, que emite energia em comprimentos específicos de onda até a região ultravioleta do espectro, formando bandas (VOGEL, 1979). Quando há a interação da

radiação eletromagnética com a matéria, há o processo de excitação molecular, conforme a quantidade de radiação emitida ou absorvida pelo material analisado. Esse fenômeno é denominado absorbância e relaciona-se com a concentração de substâncias que interagiram com a radiação, e é calculado a partir da equação 3.5.

$$A_{\lambda} = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

A_{λ} : é a absorbância por comprimento de onda específico;

I : intensidade da luz emitida (nm);

I_0 : intensidade da luz absorvida (nm).

O espectrofotômetro utilizado para a determinação do P e U foi o modelo UV – Visible Spectrophotometer – 50 Cone da Cary e os espectros obtidos foram analisados pelo software Advanced Reads.

No presente estudo, utiliza-se solução de molibdato para a determinação de P com ajuste do comprimento de onda do espectrofotômetro em 660nm, e solução de arsenazo (III) para a determinação do U com comprimento de onda de 650nm.

3.3.3.1 Determinação de fósforo (disponível) utilizando azul de molibdênio por espectrofotometria óptica

A determinação de P inicia – se com a abertura parcial das amostras, descrita no item 3.3.2, e segue utilizando a metodologia de Baird *et al* (2017) que é mostrada no fluxograma da figura 3.11.

As amostras foram analisadas em duplicata e inseridas em balões volumétricos com fenolftaleína e hidróxido de sódio a 30%. Adicionou-se ácido sulfúrico 2,5M até o ponto de viragem da fenolftaleína e o padrão de fosfato em três duplicatas escolhidas aleatoriamente para verificação do controle de qualidade das análises.

Adicionou-se o reagente combinado, que é constituído de ácido sulfúrico 2,5M, solução tartarato de amônio e potássio a 0,27%, solução de molibdato de amônio a 4% e solução de ácido ascórbico a 1,76%. Os balões foram avolumados com água destilada.

Figura 3.11: Descrição dos passos utilizados para a análise de fósforo (disponível) em espectrofotômetro óptico

Fonte: autor da dissertação

Calibra-se o espectrofotômetro a partir de cinco soluções contendo padrão de fosfato em concentrações de 0,1 a 0,5 mg L e azul de molibdênio, verificando o resultado de absorvância pela curva de calibração. Após, é efetuado a leitura de uma amostra preparada como branco e em seguida as leituras das amostras no espectrofotômetro (figura 3.12).

Figura 3.12: Determinação de fósforo (disponível) em espectrofotômetro óptico

Fonte: autor da dissertação

3.3.3.2 Determinação de U utilizando arsenazo (III) por espectrofotometria óptica

A metodologia inicia – se com a abertura total da amostra pelo método de fusão de Mester e Sturgeon (2003), onde materiais orgânicos são decompostos em elevadas temperaturas e pressão ambiente. As amostras foram finamente moídas, preparadas em cadinho de platina de forma alta com mistura de fundente (H_3BO_3 , Na_2CO_3 e KNO_3) e levadas a chama ar-GLP de um bico de Mecker por tempo suficiente para que a amostra entre em fusão. Após a fusão, o cadinho foi retirado para resfriar em temperatura ambiente, em seguida a massa fundida foi colocada dentro de um becker contendo água deionizada e aquecida com agitação magnética. Adicionou-se ácido nítrico, um bastão de vidro e cobriu-se o Becker com vidro de relógio, a solução foi então agitada até a ebulição da água e dissolução completa da massa fundida. Após, a dissolução a amostra foi resfriada, avolumada com água deionizada e armazenada em balão volumétrico identificado.

A metodologia utilizada para a determinação de U por arsenazo (III) é descrita por Savvin (1961) e está resumida no fluxograma da figura 3.13.

Figura 3.13: Descrição dos passos utilizados para a análise do U por espectrofotômetro

Fonte: autor da dissertação

O método baseia-se na separação do urânio por extração com tri-n-butil-fosfato (TBP) em isoctano 10% nas amostras que sofreram abertura total. Estas alíquotas são transferidas para balões de decantação juntamente com solução salina complexante, composta de $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) e ácido tartárico. Três amostras aleatórias do conjunto são preparadas em duplicata e adiciona-se de padrão de urânio com concentração conhecida. Esse procedimento é feito para garantir o controle de qualidade da análise. Após, é efetuada agitação vigorosa durante 60 segundos e pausa de 20 minutos para a separação da fase orgânica, onde o urânio fica retido, e da fase aquosa, que é descartada.

Lava-se a solução orgânica com solução de ácido clorídrico (HCl) em concentração 1:1, e agita-se novamente por 60 segundos, seguindo período de

pausa de 20 minutos para a separação das fases orgânica e aquosa, que é novamente descartada.

Adiciona-se a solução salina complexante II, composta de nitrato de amônio (NH_4NO_3), EDTA, sal dissódio magnésio trihidratado (CDTA) e ácido nítrico (HNO_3) em $\text{pH} = 1$, agita-se novamente por 60 segundos, seguindo período de pausa de 20 minutos para separação das fases orgânica e aquosa, que é descartada.

Adiciona-se, na fase orgânica, solução de arsenazo (III) a 0,006% em tampão de acetato 3M e agita-se por 60 segundos para a reextração do urânio, seguindo o período de pausa de 20 minutos para a separação das fases orgânica, que será descartada, e aquosa, que é recolhida em balão volumétrico e avolumada com água destilada.

Calibra-se o espectrofotômetro a partir de cinco soluções de padrão de U em concentrações de 0,001 a 0,005 mg L e arsenazo (III), verificando o resultado de absorvância pela curva de calibração. Após, é efetuado a leitura de uma amostra preparada como branco e em seguida as leituras das amostras no espectrofotômetro.

3.4 Aplicação do modelo CRS para a datação dos perfis de sedimentares

O modelo de datação que melhor se adéqua ao trabalho proposto é o *Constant Rate of Supply*, criado por Appleby & Oldfield (1978) e Robbins (1978). Este modelo baseia-se no fato da taxa de deposição do ^{210}Pb atmosférico ($^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$) presente no ambiente aquático ser transportado da solução para a matéria particulada a uma razão constante ao longo do tempo. Desta forma, a concentração do $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ presente no sedimento será dada pela soma do ^{210}Pb depositado ($^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$) mais a concentração do ^{210}Pb suportado, que se formou pelo decaimento do ^{226}Ra no próprio sedimento (equação 3.11).

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{atm}} + ^{210}\text{Pb}_{\text{suportado}}$$

Equação 3.11

Em sedimentos lacustres, teoricamente, as concentrações da atividade de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ e $^{210}\text{Pb}_{\text{suportado}}$, ou seja, o $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, no sedimento tornam-se estáveis e não são redistribuídas por deposições sedimentares futuras. Dessa forma, a concentração da atividade do $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ ao longo do perfil decai exponencialmente no decorrer do tempo, de acordo com a lei de decaimento radioativo da equação 3.12 (APPLEBY, 2001).

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde:

A : atividade (Bq);

A_0 : atividade inicial (Bq);

λ : constante de decaimento do $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ (anos);

t : tempo (anos).

Isolando o termo t da equação 3.12 de decaimento radioativo obtém-se a equação 3.13.

$$t = \frac{\ln A_0 - \ln A_x}{\lambda_{210\text{Pb}}} \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde:

t : tempo (anos);

λ : constante de decaimento do $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ (anos).

Na camada superficial do sedimento, temos que a concentração da atividade de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ é dada por $A_{(0)}$, ou seja $A_x = A_0$, e a atividade de cada secção do perfil é dada pela equação 3.14.

$$A_x = A_0 \cdot e^{-\lambda_{210\text{Pb}} \cdot \left(\frac{m}{r}\right)} \quad \text{Equação 3.14}$$

Onde:

A_x : atividade de ^{210}Pb de cada secção (Bq);

A_0 : atividade de ^{210}Pb da secção inicial (Bq);

m : massa seca de sedimento acumulada por unidade de área (g cm^{-2});
 r : taxa de sedimentação ($\text{g cm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$).

Graficando o $\ln A_x$ em função da profundidade real de seccionamento de cada fatia, obtém - se uma reta cujo coeficiente angular (inclinação da reta em relação ao eixo das abscissas) e o coeficiente linear (valor numérico por onde a reta passa no eixo das ordenadas) permitem estimar as idades para a profundidade real de cada secção.

A utilização da profundidade real para a determinação da idade pode distorcer os valores encontrados, uma vez que o peso da coluna de água e do empilhamento das secções podem causar um achatamento do perfil. Nesses casos, optou-se pela correção da profundidade, utilizando-se a densidade real, a massa total de sólidos e a umidade de cada secção, descritos nos itens 3.4.1 a 3.4.3.

3.4.1 Determinação da umidade

Para a determinação da umidade do sedimento seccionado, foi utilizada a técnica gravimétrica por estufa convencional, com termômetro calibrado na temperatura de $60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Após a secagem até o peso constante, obteve-se a massa seca de cada fatia, correspondente a massa final da amostra – a massa do recipiente, e a massa úmida que corresponde à massa inicial da amostra – a massa do recipiente. A partir desses valores, obtém - se a porcentagem de umidade real de cada fatia, através da equação 3.15.

$$\%U = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 3.15}$$

Onde:

$\%U$: teor de umidade (%);

m_s : massa seca (g);

m_u : massa úmida (g).

3.4.2 Determinação da densidade real

Com as amostras já homogeneizadas e seguindo o protocolo fornecido por Sampaio e Silva (2007), alíquotas dos sedimentos foram separadas para a determinação da densidade real.

Utilizando um picnômetro, previamente seco e pesado, adiciona-se uma alíquota da massa de sedimento e o restante do frasco é completamente preenchido com água destilada, tomando o cuidado de evitar bolhas. Com o peso do conjunto formado pelo picnômetro, sedimento e água, obteve-se o peso total. O conteúdo é descartado e nova pesagem é feita somente com o peso do picnômetro e a água destilada.

A partir desses valores, pode-se calcular a densidade real do sedimento utilizando a equação 3.16.

$$D = \frac{m_s}{(m_{pa} - m_p) - [m_t - (m_s + m_p)]}$$

Equação 3.16

Onde:

D : densidade real (g cm^{-3});

m_s : massa do sedimento (g);

m_p : massa picnômetro (g);

m_t : massa total (g);

m_{pa} : massa picnômetro + água (g).

3.4.3 Determinação da massa total de sólidos e massa acumulada

Para a determinação da massa total de sólidos foi utilizada a equação 3.17.

$$M_s = \frac{D \cdot (1 - U) \cdot V}{1 + [U \cdot (D - 1)]}$$

Equação 3.17

Onde:

M_s : massa total de sólidos (g);

D : densidade real (g cm^{-3});

U : umidade (%);

V : volume da fatia de sedimento (cm^3).

Para calcular a massa acumulada utiliza-se a equação 3.18.

$$M_A = \frac{M_s}{A_p}$$

Equação 3.18

Onde:

M_A : massa acumulada (g cm^{-2});

M_s : massa total de sólidos (g);

A_p : área do perfil (cm^2).

3.4.4 Determinação da profundidade corrigida

A profundidade corrigida é determinada pela seguinte equação 3.19.

$$Prof_c = \frac{M_A}{(M_{sAx}/h_{secção})}$$

Equação 3.19

Onde:

$Prof_c$: profundidade corrigida (cm);

M_A : massa acumulada (g cm^{-2});

M_{sAx} : massa seca da última secção (g);

$h_{secção}$: altura da secção (cm).

3.4.5 Determinação da taxa e velocidade de sedimentação

Determina-se a taxa de sedimentação de cada secção a partir da equação 3.20.

$$T_s = \frac{M_A}{Idade_c} \quad \text{Equação 3.20}$$

Onde:

T_s : taxa de sedimentação ($\text{g cm}^{-2} \text{ano}^{-1}$)

M_A : massa acumulada (g cm^{-2});

$Idade_c$: idade corrigida de cada secção (anos).

A velocidade de sedimentação é determinada pela equação 3.21.

$$V_s = \frac{Prof_c}{Idade_c} \quad \text{Equação 3.21}$$

Onde:

V_s : velocidade de sedimentação (cm ano);

$Prof_c$: profundidade corrigida (cm);

$Idade_c$: idade corrigida de cada secção (anos).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização de ^{226}Ra e ^{210}Pb nos perfis estudados

Os resultados e incertezas obtidos para a concentração de ^{226}Ra e ^{210}Pb em todas as secções de todos os perfis analisados, “Bortolan”, “Bortolan/CBA I”, “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I”, “Campestre”, “Campestre I”, “Campestre II” e “Fazenda”, estão apresentados na tabela 4.1.

Na tabela 4.2 é apresentado um quadro resumo dos resultados obtidos incluindo o intervalo de concentração de cada perfil, valor médio e sua incerteza e desvio padrão relativo.

Observando a tabela 4.2, pode – se verificar pelo valor médio dos resultados obtidos para a concentração de ^{226}Ra e ^{210}Pb , a formação de dois grupos distintos. Um dos grupos, formado pelos perfis provenientes do planalto de Poços de Caldas, apresentou valores mais altos de ^{226}Ra e ^{210}Pb .

Tabela 4.1: Concentração de radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb nos perfis sedimentares e incertezas (Bq kg^{-1}). Os valores assinalados em vermelho correspondem às secções que apresentaram concentração de ^{210}Pb menor que ^{226}Ra . As incertezas das medidas estão reportadas com base de 1σ

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Bortolan*																									
²²⁶ Ra	377 ± 17	283 ± 11	361 ± 13	474 ± 17	464 ± 17	407 ± 15	437 ± 16	355 ± 13	359 ± 14	285 ± 11	374 ± 14	278 ± 11	266 ± 10	337 ± 13	356 ± 13	349 ± 13	356 ± 13	343 ± 12	350 ± 13	346 ± 13	348 ± 13	341 ± 12	354 ± 13	366 ± 14	348 ± 13
²¹⁰ Pb	336 ± 45	302 ± 20	305 ± 14	344 ± 21	335 ± 22	380 ± 20	324 ± 20	723 ± 46	663 ± 52	300 ± 14	288 ± 17	294 ± 21	305 ± 20	304 ± 20	290 ± 19	319 ± 20	321 ± 17	307 ± 12	310 ± 18	314 ± 16	302 ± 21	290 ± 12	279 ± 20	314 ± 20	274 ± 19
Bortolan/CBA I																									
²²⁶ Ra	234 ± 09	247 ± 10	226 ± 09	235 ± 09	222 ± 10	238 ± 09	253 ± 11	248 ± 10	235 ± 09	222 ± 08	265 ± 11														
²¹⁰ Pb	270 ± 22	277 ± 19	300 ± 31	285 ± 24	390 ± 30	273 ± 25	299 ± 31	278 ± 24	281 ± 19	292 ± 13	397 ± 33														
Bortolan/CBA II																									
²²⁶ Ra	230 ± 10	217 ± 09	222 ± 09	255 ± 10	241 ± 09	277 ± 11	252 ± 10	286 ± 12	267 ± 10																
²¹⁰ Pb	322 ± 34	288 ± 24	286 ± 29	317 ± 25	289 ± 18	280 ± 28	262 ± 10	298 ± 24	262 ± 23																
Bortolan I																									
²²⁶ Ra	258 ± 04	251 ± 03	263 ± 03	258 ± 03	264 ± 03	259 ± 07	247 ± 05	241 ± 07	265 ± 06	290 ± 07	264 ± 05	264 ± 04	263 ± 07	301 ± 06	293 ± 06										
²¹⁰ Pb	338 ± 17	315 ± 15	300 ± 17	266 ± 16	283 ± 16	327 ± 32	298 ± 26	348 ± 40	306 ± 30	317 ± 36	335 ± 28	316 ± 27	361 ± 42	290 ± 35	277 ± 03										
Fazenda																									
²²⁶ Ra	215 ± 09	240 ± 10	217 ± 09	217 ± 09	205 ± 08	226 ± 09	240 ± 09	217 ± 09	214 ± 08	233 ± 11															
²¹⁰ Pb	263 ± 20	358 ± 32	301 ± 19	302 ± 23	294 ± 20	246 ± 18	227 ± 15	216 ± 22	203 ± 15	225 ± 11															
Campestre																									
²²⁶ Ra	117 ± 10	34 ± 05	41 ± 06	54 ± 03	48 ± 04	55 ± 04	66 ± 18	53 ± 04	31 ± 03	50 ± 04	41 ± 04	33 ± 03	43 ± 03	35 ± 02	27 ± 02	34 ± 02									
²¹⁰ Pb	221 ± 40	177 ± 22	200 ± 25	182 ± 12	178 ± 19	129 ± 18	113 ± 18	147 ± 20	171 ± 11	161 ± 19	136 ± 15	87 ± 10	72 ± 08	55 ± 09	53 ± 09	58 ± 09									
Campestre I																									
²²⁶ Ra	92 ± 6	58 ± 5	54 ± 5	70 ± 5	69 ± 6	66 ± 6	72 ± 6	56 ± 5	69 ± 5	48 ± 4	68 ± 5	55 ± 4	68 ± 5	43 ± 4	60 ± 5	76 ± 5	62 ± 4	105 ± 7							
²¹⁰ Pb	154 ± 20	139 ± 17	160 ± 18	102 ± 16	114 ± 22	111 ± 16	106 ± 17	122 ± 15	84 ± 14	95 ± 14	86 ± 16	87 ± 16	93 ± 17	83 ± 15	109 ± 19	60 ± 10	60 ± 10	60 ± 10							
Campestre II																									
²²⁶ Ra	116 ± 8	78 ± 8	73 ± 5	58 ± 6	78 ± 5	68 ± 4	73 ± 5	77 ± 5	73 ± 5	79 ± 5	78 ± 5	82 ± 5	81 ± 5	86 ± 6	76 ± 12										
²¹⁰ Pb	253 ± 40	207 ± 32	209 ± 22	181 ± 25	139 ± 20	143 ± 20	142 ± 21	148 ± 22	152 ± 21	124 ± 20	98 ± 14	82 ± 15	66 ± 15	74 ± 16	60 ± 10										

Fonte: autor da dissertação

A concentração média do ^{226}Ra nestes perfis foi maior do que o valor definido no UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) como valor médio mundial em solo (35 Bq kg^{-1}). O segundo grupo de perfis, oriundos da cidade de Campestre, apresentou valores médios de concentração de ^{226}Ra e ^{210}Pb mais baixos, no caso de radionuclídeo ^{226}Ra da mesma ordem de grandeza dos valores definidos no UNSCEAR (UNSCEAR, 2000).

Tabela 4.2: Quadro resumo dos resultados de intervalo de concentração dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb de cada perfil, valor médio, incerteza ($\pm$) e desvio padrão relativo.

Amostras	Intervalo (Bq kg^{-1})		Media (Bq kg^{-1})		Desvio P. Relativo (%)	
	^{226}Ra	^{210}Pb	^{226}Ra	^{210}Pb	^{226}Ra	^{210}Pb
Bortolan	266 - 474	274 - 723	357 ± 51	341 ± 109	14	32
Bortolan/CBA I	222 - 265	270 - 397	239 ± 14	304 ± 45	6	15
Bortolan/CBA II	217 - 286	262 - 322	248 ± 25	293 ± 20	10	7
Bortolan I	241 - 301	266 - 361	265 ± 17	312 ± 27	6	9
Fazenda	205 - 240	203 - 358	222 ± 12	264 ± 49	5	19
Campestre	27 - 117	53 - 211	48 ± 21	133 ± 54	45	41
Campestre I	43 - 105	60 - 160	66 ± 15	101 ± 29	22	29
Campestre II	58 - 116	60 - 253	78 ± 12	139 ± 57	16	41

Fonte: autor da dissertação

Os valores mais altos encontrados no Planalto de Poços de Caldas correspondem aos perfis da represa Bortolan (“Bortolan”, “Bortolan/CBA I”, “Bortolan/CBA II” e “Bortolan I”) e da Fazenda Terra Nova em Poços de Caldas. Esses valores mais altos podem ser devidos a ações antrópicas ou à formação geológica da região de Poços de Caldas, que apresenta alta radiação de fundo. Os valores obtidos para todos os perfis da represa Bortolan são da mesma ordem de grandeza de valores da literatura para essa represa (COMISSÃO DAS ÁGUAS, 2012), que apresentaram concentração de ^{226}Ra para sedimentos superficiais variando de 180 a 280 Bq kg^{-1} e para ^{210}Pb , de 220 a 500 Bq kg^{-1} . Para os valores de concentração desses radionuclídeos em sedimentos no planalto de Poços de Caldas e a montante da INB – Caldas, o relatório da Comissão das Águas, obteve resultados de concentrações que variaram até 220 Bq kg^{-1} para ^{226}Ra e até 235 Bq kg^{-1} para ^{210}Pb , confirmando a alta radiação de fundo na região.

O segundo grupo, constituído pelos perfis da represa Poço Fundo (“Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II”) se localiza fora da área de influência do Planalto de Poços de Caldas, em Campestre, razão pela qual os valores encontrados são mais próximos de valores médios mundiais.

Os valores obtidos para os desvios padrão relativos, apresentados na tabela 4.2, foram satisfatórios, variando de 5% a 22%, excetuando o perfil “Campestre”, que apresentou valores maiores de 40%.

Investigando a tabela 4.1, verifica-se que algumas secções dos perfis “Bortolan”, “Bortolan/CBA II”, “Campestre I”, “Campestre II” e “Fazenda”, assinalados em vermelho, apresentaram concentração de ^{226}Ra maior que a concentração de ^{210}Pb .

Para visualizar como a concentração dos radionuclídeos variou ao longo da profundidade em todos os perfis estudados, foram plotados os gráficos apresentados na figura 4.1.

Examinando os gráficos da figura 4.1 de uma maneira geral, verifica-se como era esperado, que a concentração de ^{226}Ra é inferior a concentração de chumbo nas primeiras secções de todos os perfis e constante ao longo dos mesmos. Esse comportamento é esperado, pois nas primeiras secções a concentração de ^{210}Pb é devida à somatória do ^{210}Pb suportado com o ^{210}Pb atmosférico.

Nos perfis onde a concentração de ^{210}Pb decresce longitudinalmente e torna-se equivalente à do ^{226}Ra , verifica-se que o equilíbrio secular entre os radionuclídeos pai e filho foi alcançado. Este comportamento ficou evidenciado principalmente nos perfis “Bortolan/CBA II”, “Campestre” e “Campestre II”. Este acréscimo de ^{210}Pb nas primeiras secções, se deve à deposição atmosférica deste elemento.

Alguns perfis apresentaram secções com concentração de ^{226}Ra maior que ^{210}Pb , principalmente nas fatias mais profundas. Isto implica na ausência de equilíbrio secular. Os valores maiores de ^{226}Ra em relação ao ^{210}Pb podem ser devidos às incertezas das medidas, uma vez que as concentrações encontradas para ^{226}Ra e ^{210}Pb são próximas e as medidas de ^{210}Pb não foram corrigidas para a auto absorção. Outra explicação para estes valores de ^{226}Ra mais altos, pode ser que as camadas inferiores dos perfis apresentem influência da composição do solo do Planalto de Poços de Caldas. Neste caso,

as secções mais profundas destes perfis representam a composição do solo original. Foi verificado que esses pontos mais profundos apresentaram densidade diferente do restante do perfil, que pode interferir na medida da concentração de ^{210}Pb , pois não foi determinada a auto-absorção na própria amostra.

Analisando os gráficos da figura 4.1 de uma maneira geral, verifica-se que os perfis “Bortolan” e “Fazenda” pertencentes ao planalto de Poços de Caldas, exibem ao longo do perfil concentrações de ^{226}Ra maiores que as de ^{210}Pb , inviabilizando a aplicação do modelo CRS para a datação. Os perfis “Campestre I” e “Campestre II”, pertencentes a represa Poço Fundo em Campestre, também apresentam em suas secções mais profundas concentrações de ^{226}Ra maiores que as de ^{210}Pb , porém, como a concentração desses radionuclídeos nessa represa é baixa e da mesma ordem de grandeza da literatura (UNSCEAR, 2000), associa-se inversão das concentrações dos radionuclídeos à incerteza das medidas.

Figura 4.1: Concentração de radionuclídeos ao longo dos perfis “Bortolan”, “Bortolan/CBA I”, “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I”, “Fazenda”, “Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II”

Perfil Bortolan/CBA II **Perfil Bortolan I** **Perfil Fazenda** **Perfil Campestre**

Fonte: autor da dissertação

Em vista dos resultados obtidos na tabela 4.1 foram escolhidos os perfis mais favoráveis para a aplicação do modelo CRS, datação e avaliação da taxa e velocidade de sedimentação: “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I”, “Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II”.

4.2 Determinação da Taxa e Velocidade de Sedimentação e Datação dos Perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I”, “Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II”

Para a aplicação do Modelo CRS nos perfis sedimentares foi determinada a concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ pela diferença entre a concentração total de ^{210}Pb e a concentração de ^{226}Ra nas secções (tabela 4.1). Foram então escolhidos para este estudo os perfis “Bortolan/CBA II” e “Bortolan I”, situados no planalto de Poços de Caldas, e “Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II” pertencentes à represa Poço Fundo no município de Campestre e que se

localiza fora da influência da região do planalto, visto que esses perfis demonstram as características ideais para a datação.

Foram determinados para os perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I”, “Campestre”, “Campestre I” e “Campestre II” a taxa e velocidade de sedimentação e a idade para cada secção.

4.2.1 “Bortolan/CBA II”

Situado na entrada do Ribeirão das Antas na represa Bortolan, e à jusante das indústrias Yoorin, CBA e INB, o ponto onde foi coletado o perfil “Bortolan/CBA II” encontrava-se sob uma coluna de água de cerca de 2 metros. Esse perfil sedimentar apresentou 18 centímetros e foi seccionado a cada 2 centímetros, totalizando 09 amostras.

Os resultados obtidos para a umidade, densidade real, massa total de sólidos e profundidade real, estão expressos na tabela 4.3. Esses parâmetros foram utilizados para a correção da profundidade e obtenção da profundidade corrigida.

Tabela 4.3: Valores de umidade, densidade real, massa total de sólidos, profundidade real e corrigida do perfil “Bortolan/CBA II”

Amostras	Prof. real (cm) ^a	M. úmida (g) ^b	M. seca (g) ^b	Umidade (%)	Dens. real (g)	M. sólidos (g) ^b	Prof. corrigida (cm)
Bort/CBA II – 01	2,00	119,65	39,58	67	2,50	33,63	1,30
Bort/CBA II – 02	4,00	103,53	32,60	69	2,50	31,63	2,51
Bort/CBA II – 03	6,00	120,00	50,58	58	2,49	45,83	4,28
Bort/CBA II – 04	8,00	99,89	38,73	61	2,72	41,87	5,89
Bort/CBA II – 05	10,00	156,04	66,70	57	2,60	47,17	7,71
Bort/CBA II – 06	12,00	75,94	38,18	58	2,53	46,44	9,50
Bort/CBA II – 07	14,00	115,64	50,58	56	2,53	48,36	11,36
Bort/CBA II – 08	16,00	114,80	51,91	55	2,52	50,61	13,31
Bort/CBA II – 09	18,00	97,94	45,31	54	2,63	52,87	15,35

^a Incerteza para profundidade real é de 0,25 cm.

^b Incerteza para massa úmida, massa seca e massa total de sólidos é de 0,01g

Fonte: autor da dissertação

Analisando a tabela 4.3, verifica-se como era esperado, que a umidade decresce em razão da profundidade, diminuindo o teor de água e aumentando a massa seca.

As secções exibem coloração e densidades reais constantes, indicando que não houve variações de granulometria.

A massa total de sólidos, que foi calculada baseada na umidade e densidade real, apresenta aumento ao longo do perfil e foi utilizada juntamente com a massa seca para obter a profundidade corrigida.

Ao comparar os valores da profundidade corrigida obtida com os valores da profundidade real, verifica-se que os valores são bem próximos e, portanto, favoráveis para a aplicação do modelo CRS.

Dando prosseguimento ao estudo, determina-se então a diferença entre a atividade dos radionuclídeos ^{210}Pb e ^{226}Ra (tabela 4.1) e obtém-se o valor do $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$. Plota-se então, o gráfico de $\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ em função da profundidade real (figura 4.2).

Figura 4.2: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em função da profundidade real para o perfil “Bortolan/CBA II”

Fonte: autor da dissertação

Ao observar os valores obtidos no gráfico da figura 4.2, verifica-se que a concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ apresenta comportamento linear em relação à profundidade, excetuando o ponto referente aos 12 cm de profundidade, que apresentou valor de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ muito baixo com uma incerteza grande. Ainda na figura 4.2, nota-se que a reta é levemente inclinada, indicando que o coeficiente angular é negativo e que os valores da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$

estão dentro dos limites da covariância, gerando um bom conjunto estatístico com resultados aceitáveis e, portanto, favoráveis à aplicação do modelo CRS.

Utilizando-se os coeficientes lineares e angulares da reta calcula-se a idade para cada secção do perfil, representada na figura 4.3 em função da profundidade real.

Figura 4.3: Representação da idade em função da profundidade real do perfil “Bortolan/CBA II”

Fonte: autor da dissertação

As idades obtidas variaram de $6,4 \pm 0,9$ anos a $50,9 \pm 1,4$ anos. Essa idade é bem condizente com a data na qual a represa Bortolan entrou em operação (60 anos) (DME,2016).

A determinação da idade foi realizada também utilizando-se a profundidade corrigida (tabela 4.3), conforme sugerido pelo modelo CRS. A figura 4.4 apresenta o gráfico da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ em função da profundidade corrigida.

Com a correção da profundidade, verifica-se uma redução no tamanho do perfil, devido ao achatamento da coluna de água. A concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ apresentou um comportamento linear ao longo do perfil, com exceção do ponto correspondente à profundidade corrigida de 9,5 cm, pois a concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ é muito baixa e apresenta alta incerteza devido ao erro da medida. Também é observado que a reta se torna mais inclinada, indicando um coeficiente angular negativo e menor se comparado com a reta da figura 4.2; os valores da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ estão delimitados pela

covariância e fornecem um conjunto estatístico com bons resultados e dessa forma, viabilizou a aplicação do modelo CRS.

Figura 4.4: Valores de $\ln^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ em função da profundidade corrigida para o perfil “Bortolan/CBA II”

Fonte: autor da dissertação

A partir do gráfico da figura 4.4, são obtidos os coeficientes angulares e lineares corrigidos da reta e determina-se as idades em função da profundidade corrigida. Essas idades estão expostas no gráfico da figura 4.5 em função da profundidade corrigida.

Figura 4.5: Representação da idade em função da profundidade corrigida do perfil “Bortolan/CBA II”

Fonte: autor da dissertação

As idades obtidas variaram de $7,1 \pm 1,4$ anos a $72,6 \pm 2,4$ anos. Comparando-se os resultados da idade obtida pelo modelo CRS utilizando-se a profundidade real e a profundidade corrigida, verifica-se que os resultados são compatíveis e da mesma ordem de grandeza da idade em que a represa Bortolan entrou em operação. A correção da profundidade, neste caso pouco alterou os resultados.

As profundidades real e corrigida e as datas referentes a elas, são apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Datas referentes as profundidades reais e corrigidas do perfil "Bortolan/CBA II"

Perfil "Bortolan/CBA II"			
Prof. real (cm)	Data a partir da prof. real (anos)	Data a partir da prof. corrigida (anos)	Prof. corrigida (cm)
2,00	2010	2009	1,30
4,00	2003	2002	2,51
6,00	1997	1993	4,28
8,00	1991	1984	5,89
10,00	1984	1974	7,71
12,00	1978	1964	9,50
14,00	1971	1954	11,36
16,00	1965	1943	13,31

Fonte: autor da dissertação

Para a determinação da taxa de sedimentação foram calculadas as massas acumuladas em cada secção, de acordo com a equação 3.18 apresentada no item 3.4.5. Na tabela 4.5 são apresentados os resultados obtidos para a massa acumulada e a taxa de sedimentação.

Verifica-se que a massa acumulada apresentou pouco acréscimo de massa ao longo do perfil, não variando substancialmente. Consequentemente a taxa de sedimentação foi baixa, variando de $0,02$ a $0,12 \text{ g cm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. A velocidade de sedimentação obtida foi de $0,18 \text{ cm ano}$.

Tabela 4.5: Resultados de massa acumulada e taxa de sedimentação do perfil “Bortolan/CBA II”

Amostras	M. acumulada (g cm⁻²)	Taxa de sedimentação (g cm⁻² ano⁻¹)
Bort/CBA II - 01	0,83	0,12
Bort/CBA II - 02	0,78	0,06
Bort/CBA II - 03	1,13	0,05
Bort/CBA II - 04	1,03	0,03
Bort/CBA II - 05	1,16	0,03
Bort/CBA II - 06	1,14	0,02
Bort/CBA II - 07	1,19	0,02
Bort/CBA II - 08	1,24	0,02

Fonte: autor da dissertação

Moreira (2017) estudou a bacia hidrográfica do Ribeirão das Antas e constatou que essa região possui baixa taxa de sedimentação (média de 0,355 ton ha⁻¹ ano⁻¹), corroborando o valor baixo de sedimentação obtido por esse estudo.

4.2.2 “Bortolan I”

O ponto de coleta desse perfil situa-se próximo a barragem da represa Bortolan, a malha urbana e a jusante de atividades agrícolas. O perfil sedimentar foi retirado sob uma coluna de água de cerca de 4 metros e apresentou 29 cm, sendo seccionado a cada 2 centímetros, exceto a última secção que apresentou 1 centímetro, totalizando 15 amostras.

Na tabela 4.6 estão descritos os resultados obtidos para a umidade, densidade real, massa total de sólidos e profundidade real, que foram utilizados para correção e obtenção da profundidade de cada secção.

Analisando a tabela 4.6 nota-se que há um decréscimo na massa úmida, e na umidade ao longo do perfil. Entre a primeira e a segunda secção, verifica-se um decréscimo brusco e o restante do perfil apresenta pequenas flutuações. A massa seca segue a tendência contrária e aumenta conforme as secções se tornam mais profundas. Deve-se considerar que a última secção, caracterizada pela amostra “Bort I – 15”, possui massa úmida e massa seca menores que o

restante do perfil, visto que seu volume foi reduzido pela metade, mas ainda mantém a mesma proporção dos resultados das demais amostras.

Tabela 4.6: Valores de umidade, densidade real, massa total de sólidos, profundidade real e corrigida do perfil “Bortolan I”

Amostras	Prof. real (cm) ^a	M. úmida (g) ^b	M. seca (g) ^b	Umidade (%)	Dens. real (g)	M. sólidos (g) ^b	Prof. corrigida (cm)
Bort I – 01	2,00	149,56	22,24	85	2,41	13,27	0,67
Bort I – 02	4,00	104,11	26,81	74	2,22	24,42	1,90
Bort I – 03	6,00	104,59	33,51	68	2,41	32,11	3,51
Bort I – 04	8,00	107,95	36,47	66	2,41	34,30	5,24
Bort I – 05	10,00	102,24	33,45	67	2,30	32,69	6,89
Bort I – 06	12,00	99,50	31,06	67	2,44	31,15	8,45
Bort I – 07	14,00	97,52	30,58	69	2,32	31,07	10,02
Bort I – 08	16,00	101,08	34,57	69	2,29	34,49	11,76
Bort I – 09	18,00	111,23	39,60	66	2,43	36,67	13,61
Bort I – 10	20,00	112,41	41,98	64	2,35	38,72	15,56
Bort I – 11	22,00	114,41	44,78	61	2,32	40,98	17,62
Bort I – 12	24,00	104,88	40,23	62	2,51	40,60	19,66
Bort I – 13	26,00	105,18	39,72	62	2,32	39,18	21,64
Bort I – 14	28,00	110,56	42,61	61	2,42	40,55	23,68
* Bort I – 15	29,00	60,45	23,85	61	2,40	20,88	24,73

^a Incerteza para profundidade real é de 0,25 cm.

^b Incerteza para massa úmida, massa seca e massa total de sólidos é de 0,01g

* Amostra possui 1 cm.

Fonte: autor da dissertação

Analisando a tabela 4.6 nota-se que há um decréscimo na massa úmida, e na umidade ao longo do perfil. Entre a primeira e a segunda secção, verifica-se um decréscimo brusco e o restante do perfil apresenta pequenas flutuações. A massa seca segue a tendência contrária e aumenta conforme as secções se tornam mais profundas. Deve-se considerar que a última secção, caracterizada pela amostra “Bort I – 15”, possui massa úmida e massa seca menores que o restante do perfil, visto que seu volume foi reduzido pela metade, mas ainda mantém a mesma proporção dos resultados das demais amostras.

As secções exibem coloração e densidades reais constantes, indicando que não houve variações de granulometria.

Calcula-se a massa total de sólidos utilizando a umidade e a densidade real, que apresenta aumento ao longo do perfil. Esses dados são usados juntamente com a massa seca para a obtenção da profundidade corrigida.

Comparando a profundidade real com os valores de profundidade corrigida obtidos, constata-se que o achatamento natural do perfil causado pela compactação é pequeno, sendo os valores reais e corrigidos próximos e favoráveis para a aplicação do modelo CRS.

Dando prosseguimento ao estudo, determina-se então a diferença entre a atividade dos radionuclídeos ^{210}Pb e ^{226}Ra (tabela 4.1) e obtém-se o valor do $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$. Plota-se então, o gráfico de $\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ em função da profundidade real (figura 4.6), para todas as secções excetuando-se as amostras “Bortolan I – 14” e “Bortolan I – 15” que apresentaram $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ negativo.

Figura 4.6: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em razão da profundidade real para o perfil “Bortolan I”

Fonte: autor da dissertação

Analisando o gráfico da figura 4.6, constata-se que os valores das concentrações de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ apresentam comportamento senoidal e que a incerteza para a secção de 8 cm, caracterizada pela amostra “Bort I – 04”, é discrepante se comparada com as demais. Tal efeito é explicado pela aproximação entre os valores de ^{226}Ra e ^{210}Pb , que diminui o valor de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ e aumenta a incerteza da medida. O gráfico exibe uma reta inclinada, indicando que o coeficiente angular é negativo. Os valores da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$

estão dentro dos limites da covariância e fornece um bom conjunto estatístico com resultados aceitáveis e, portanto, favoráveis à aplicação do modelo CRS.

Utilizam-se então os coeficientes angulares e lineares da reta para o cálculo das idades reais para esse perfil, representadas na figura 4.7.

Figura 4.7: Representação da idade em função da profundidade real do perfil “Bortolan I”

Fonte: autor da dissertação

As idades obtidas variaram de $3,6 \pm 0,6$ anos a $46,7 \pm 1,4$ anos. Embora as duas últimas secções não tenham sido incluídas na análise, os resultados obtidos estão em concordância com a data do início de operação da represa Bortolan, de 1956 (DME,2016).

O estudo desse perfil foi realizado, utilizando-se também os valores da profundidade corrigida (figura 4.8).

A secção “Bortolan I – 04” manteve a incerteza elevada devido ao erro da medida. A reta fornecida pelo gráfico da figura 4.8 é menos inclinada em comparação com o gráfico da figura 4.6, pois o valor para seu coeficiente angular é maior. As concentrações de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ ficam dentro dos limites da covariância e fornecem o conjunto estatístico com resultados aplicáveis ao modelo CRS.

Figura 4.8: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em razão da profundidade corrigida para o perfil “Bortolan I”

Fonte: autor da dissertação

Utilizam-se então os coeficientes angulares e lineares da reta para o cálculo das idades para esse perfil, representadas na figura 4.9, em função da profundidade corrigida.

Figura 4.9: Representação da idade em função da profundidade corrigida do perfil “Bortolan I”

Fonte: autor da dissertação

As idades obtidas utilizando as profundidades corrigidas variaram de $0,7 \pm 0,7$ anos a $22,4 \pm 1,8$ anos. Analisando os resultados, temos que a correção da profundidade nesse caso, alterou significativamente os resultados

para a idade da represa Bortolan, não estando de acordo com a data do início de operação da mesma, em 1956.

As profundidades real e corrigida e as datas referentes a elas, são apresentadas na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Datas referentes as profundidades reais e corrigidas do perfil "Bortolan I"

Perfil "Bortolan I"			
Prof. real (cm)	Data a partir da prof. real (anos)	Data a partir da prof. corrigida (anos)	Prof. corrigida (cm)
2,00	2013	2016	0,67
4,00	2010	2015	1,90
6,00	2006	2013	3,51
8,00	2003	2012	5,24
10,00	1999	2010	6,89
12,00	1995	2008	8,46
14,00	1992	2007	10,02
16,00	1988	2005	11,76
18,00	1985	2003	13,61
20,00	1981	2001	15,56
22,00	1977	1999	17,62
24,00	1974	1997	19,66
26,00	1970	1995	21,64
28,00	1967	1992	23,68

Fonte: autor da dissertação

A taxa de sedimentação para cada secção foi calculada a partir da massa acumulada (equação 3.18, apresentada no item 3.4.5). Na tabela 4.8 são apresentados os resultados obtidos para a massa acumulada e a taxa de sedimentação.

Verifica-se que a massa acumulada apresentou pouco acréscimo de massa ao longo do perfil, não variando substancialmente. Consequentemente a taxa de sedimentação foi baixa, variando 0,04 a 0,47 g cm⁻² ano⁻¹. A velocidade de sedimentação obtida foi 0,97 cm ano.

Tabela 4.8: Resultados de massa acumulada e taxa de sedimentação do perfil “Bortolan I”

Amostras	M. acumulada (g cm ⁻²)	Taxa de sedimentação (g cm ⁻² ano ⁻¹)
Bort I - 01	0,33	0,47
Bort I - 02	0,60	0,31
Bort I - 03	0,79	0,22
Bort I - 04	0,84	0,16
Bort I - 05	0,80	0,11
Bort I - 06	0,77	0,09
Bort I - 07	0,76	0,07
Bort I - 08	0,85	0,07
Bort I - 09	0,90	0,06
Bort I - 10	0,95	0,06
Bort I - 11	1,01	0,06
Bort I - 12	1,00	0,05
Bort I - 13	0,96	0,04

Fonte: autor da dissertação

Os resultados obtidos para as taxas e velocidade de sedimentação devem ser analisados com cautela, visto que a idade obtida pela profundidade corrigida de cerca de 22 anos não condiz com a idade real da represa Bortolan de 60 anos (DME, 2016). Essa diferença entre as idades pode ser decorrente da distinta dinâmica sedimentar do local de coleta desse perfil, sendo diferente do leito principal da represa, e, portanto, apresentando resultados nem sempre adequados.

4.2.3 “Campestre”

Pertencente à outra bacia hidrográfica do rio Machado e fora da influência do planalto de Poços de Caldas, esta represa apresentou as condições necessárias para ser utilizada como grupo controle.

O perfil sedimentar foi coletado sob uma coluna d’água de 4 metros e apresentou 32 cm. Este perfil foi seccionado a cada 2 cm, totalizando 16 amostras.

Na tabela 4.9, são apresentados os resultados obtidos para a umidade, densidade real, massa total de sólidos e profundidade real. Esses parâmetros foram utilizados para a correção da profundidade.

Tabela 4.9: Valores de umidade, densidade real, massa total de sólidos e profundidade real e corrigida para o perfil “Campestre”

Amostras	Prof. real (cm) ^a	M. úmida (g) ^b	M. seca (g) ^b	Umidade (%)	Dens. real (g)	M. sólidos (g) ^b	Prof. corrigida (cm)
Camp - 01	2,00	74,93	5,74	92	2,29	6,52	0,76
Camp - 02	4,00	83,77	8,54	90	2,14	8,78	1,79
Camp - 03	6,00	81,14	9,94	88	2,30	10,72	3,05
Camp - 04	8,00	95,35	13,85	85	2,38	12,92	4,57
Camp - 05	10,00	92,05	15,14	84	2,30	14,77	6,3
Camp - 06	12,00	93,90	17,04	82	2,37	16,51	8,24
Camp - 07	14,00	97,33	18,41	81	2,27	17,22	10,26
Camp - 08	16,00	94,70	18,39	81	2,21	17,70	12,33
Camp - 09	18,00	80,16	13,82	83	2,39	15,60	14,16
Camp - 10	20,00	83,55	12,68	85	2,23	13,49	15,75
Camp - 11	22,00	90,32	14,22	84	2,58	14,19	17,41
Camp - 12	24,00	94,78	17,05	82	2,09	16,16	19,31
Camp - 13	26,00	94,47	24,60	74	1,57	23,43	21,11
Camp - 14	28,00	101,34	31,12	69	1,92	29,33	23,38
Camp - 15	30,00	119,74	38,73	68	1,50	29,54	25,65
Camp - 16	32,00	82,79	25,93	69	1,68	29,22	27,91

^a Incerteza para profundidade real é de 0,25 cm.

^b Incerteza para massa úmida, massa seca e massa total de sólidos é de 0,01g.

Fonte: autor da dissertação

Observando a tabela 4.9, verifica-se que o teor de água diminui e a massa seca cresce ao longo do perfil. Esse comportamento é esperado, visto que a umidade decresce em razão da profundidade.

As secções exibiram coloração e densidades constantes até os 24 cm e depois descresem até a última secção do perfil. Provavelmente estas últimas secções são em sua constituição, particularmente compostas de granulometrias diferentes das demais secções do perfil, e por esta razão, não foram incluídas na aplicação do modelo CRS.

A massa total de sólidos, calculada utilizando a umidade e densidade real, apresenta aumento ao longo do perfil. O valor da massa total de sólidos é utilizado conjuntamente com a massa seca para a obtenção da profundidade corrigida.

Comparando os valores obtidos para a profundidade corrigida com os valores da profundidade real, verifica-se que os dois encontram-se próximos e, logo, favoráveis à aplicação do modelo CRS.

Determina-se pela diferença entre a atividade dos radionuclídeos ^{210}Pb e ^{226}Ra (tabela 4.1) para obter o valor do $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ e calcula-se os valores para o $\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$, que são graficados em função da profundidade real (figura 4.10).

Figura 4.10: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em razão da profundidade real para o perfil “Campestre”

Fonte: autor da dissertação

Verificando os valores obtidos no gráfico da figura 4.10, observa-se que a concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ apresenta comportamento senoidal em relação a profundidade e a reta obtida é inclinada, com valor de coeficiente angular negativo. Os resultados obtidos, são satisfatórios, visto que as concentrações de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ estão dentro dos limites da covariância, portanto, resultados aplicáveis ao modelo CRS.

Utilizam-se os coeficientes angulares e lineares da reta para calcular as idades em função da profundidade real para cada secção do perfil, representada na figura 4.11.

As idades variaram de $4,9 \pm 0,5$ anos a $58,2 \pm 1,0$ anos e são consideradas condizentes com a data na qual a represa Poço Fundo entrou em funcionamento (67 anos) (CEMIG, 2006).

Figura 4.11: Representação da idade em função da profundidade real do perfil “Campestre”

Fonte: autor da dissertação

Conforme o modelo CRS propõe, calcula-se também a determinação da idade utilizando a profundidade corrigida (tabela 4.5). O $\ln^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ em razão da profundidade corrigida é exibido na figura do gráfico 4.12.

Figura 4.12: Valores de $\ln\text{Pb-210}$ em razão da profundidade corrigida para o perfil “Campestre”

Fonte: autor da dissertação

Os valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ das secções apresentam novamente comportamento senoidal ao longo do perfil, mas apresentam pontos fora do limite de covariância, diminuindo o conjunto estatístico e sua confiabilidade. A reta obtida pelo gráfico é inclinada, com valor de coeficiente angular negativo.

Utilizando-se os coeficientes lineares e angulares da reta calculou-se a idade em função da profundidade corrigida para cada secção do perfil, representada na figura 4.13.

Figura 4.13: Representação da idade em função da profundidade corrigida do perfil “Campestre”

Fonte: autor da dissertação

As idades variaram de $3,2 \pm 0,5$ anos a $83,2 \pm 1,0$ anos. Pode-se perceber que a data limite, referente à secção 24 cm, foi considerada um pouco superior a data na qual a represa Poço Fundo entrou em funcionamento (67 anos) (CEMIG, 2006). A correção da profundidade nessa situação acabou por aumentar a idade, visto que na figura do gráfico 4.12, percebe-se claramente mais da metade dos pontos ficaram fora do limite da covariância, afetando a aplicação do modelo CRS.

As profundidades real e corrigida e as datas referentes a elas, são apresentadas na tabela 4.10.

Tabela 4.10: Datas referentes às profundidades reais e corrigidas do perfil "Campestre"

Perfil "Campestre"			
Prof. real (cm)	Data a partir da prof. real (anos)	Data a partir da prof. corrigida (anos)	Prof. corrigida (cm)
2,00	2011	2013	0,76
4,00	2006	2008	1,79
6,00	2001	2003	3,05
8,00	1997	1996	4,57
10,00	1992	1989	6,30
12,00	1987	1981	8,24
14,00	1982	1972	10,26
16,00	1977	1963	12,33
18,00	1972	1955	14,16
20,00	1968	1948	15,75
22,00	1963	1941	17,41
24,00	1958	1933	19,31

Fonte: autor da dissertação

A taxa de sedimentação para cada secção de profundidade corrigida foi calculada a partir da massa acumulada (equação 3.18, apresentada no item 3.4.5). Os resultados obtidos para a massa acumulada e taxa de sedimentação são apresentados na tabela 4.11.

Tabela 4.11: Resultados de massa acumulada e taxa de sedimentação do perfil "Campestre"

Amostras	M. acumulada (g cm ⁻²)	Taxa de sedimentação (g cm ⁻² ano ⁻¹)
Camp - 01	0,16	0,05
Camp - 02	0,22	0,03
Camp - 03	0,26	0,02
Camp - 04	0,32	0,02
Camp - 05	0,36	0,01
Camp - 06	0,41	0,01
Camp - 07	0,42	0,01
Camp - 08	0,43	0,01
Camp - 09	0,38	0,01
Camp - 10	0,33	0,01
Camp - 11	0,35	0,01
Camp - 12	0,40	0,01

Fonte: autor da dissertação

Verifica-se que a massa acumulada apresentou pouco acréscimo de massa ao longo do perfil. Esse fato é confirmado pela baixa taxa de sedimentação que variou entre 0,01 a 0,05 g cm⁻² ano⁻¹. A velocidade de sedimentação é calculada apresentou valor fixo de 0,23 cm/ano.

4.2.4 “Campestre I”

O perfil sedimentar foi coletado fora da influência do planalto de Poços de Caldas, na bacia hidrográfica do rio Machado, sob uma coluna d’água de 4 metros e apresentou 35 cm. Este perfil foi seccionado a cada 2 cm, exceto a última secção que apresentou 1 cm, totalizando 18 amostras.

Na tabela 4.12, são apresentados os resultados obtidos para a umidade, densidade real, massa total de sólidos e profundidade real. Esses parâmetros foram utilizados para a correção da profundidade.

Tabela 4.12: Valores de umidade, densidade real, massa total de sólidos e profundidade real e corrigida para o perfil “Campestre I”

Amostras	Prof. real (cm) ^a	M. úmida (g) ^b	M. seca (g) ^b	Umidade (%)	Dens. real (g)	M. sólidos (g) ^b	Prof. corrigida (cm)
Camp I - 01	2,00	80,79	13,77	83	2,14	15,42	1,21
Camp I - 02	4,00	100,10	19,48	81	2,42	17,74	2,62
Camp I - 03	6,00	87,12	19,45	78	2,10	20,91	4,25
Camp I - 04	8,00	97,47	24,17	75	2,19	23,63	6,10
Camp I - 05	10,00	94,18	23,76	75	1,85	23,97	7,93
Camp I - 06	12,00	99,09	24,09	76	1,94	23,11	9,71
Camp I - 07	14,00	96,85	24,62	75	2,12	24,20	11,60
Camp I - 08	16,00	97,90	26,25	73	2,42	25,71	13,65
Camp I - 09	18,00	96,59	27,20	72	2,39	27,49	15,81
Camp I - 10	20,00	97,92	28,56	71	2,14	28,54	18,04
Camp I - 11	22,00	106,92	31,99	70	2,44	29,36	20,38
Camp I - 12	24,00	105,01	32,35	69	2,20	30,79	22,76
Camp I - 13	26,00	96,68	29,32	69	2,32	29,86	25,12
Camp I - 14	28,00	95,72	28,41	70	2,50	29,27	27,45
Camp I - 15	30,00	94,96	25,30	73	1,51	12,85	29,33
Camp I - 16	32,00	192,78	73,47	62	2,21	19,61	32,43
Camp I - 17	34,00	108,90	52,52	52	2,16	26,51	36,62
Camp I - 18	35,00	24,98	11,88	52	2,50	27,11	40,91

^a Incerteza para profundidade real é de 0,25 cm.

^b Incerteza para massa úmida, massa seca e massa total de sólidos é de 0,01g.

Fonte: autor da dissertação

Verifica-se pela tabela 4.6 que o teor de água diminui e a massa seca aumenta ao longo do perfil, visto que a umidade decresce em razão da profundidade.

As secções exibem flutuações na densidade ao longo do perfil e coloração desigual, indicando que o perfil pode conter granulometria heterogênea. A massa total de sólidos tem um aumento constante até a secção da amostra “Camp I – 12” e decresce até a última secção. O valor da massa total de sólidos é utilizado conjuntamente com a massa seca para a obtenção da profundidade corrigida.

Os valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ foram obtidos pela diferença entre a atividade dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb (tabela 4.1). As amostras “Camp I – 16” a “Camp I – 18”, possuem valores negativos de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$, e foram excluídas pela inviabilização da aplicação do modelo CRS. Os valores de $\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ das demais secções foram calculados e plotados em função da profundidade real na figura 4.14, com a reta ajustada para se obter o melhor resultado.

Figura 4.14: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em razão da profundidade real para o perfil “Campestre I”

Fonte: autor da dissertação

Ao observar os valores obtidos no gráfico da figura 4.14, verifica-se que a concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ apresenta comportamento senoidal em relação à profundidade. A reta obtida pelo gráfico é inclinada, indicando que o coeficiente angular é negativo. Os valores da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ estão dentro dos

limites da covariância, gerando um bom conjunto estatístico com resultados aceitáveis e, portanto, favoráveis à aplicação do modelo CRS.

Utilizando-se os coeficientes lineares e angulares da reta calcula-se a idade para cada secção do perfil, representada na figura 4.15 em função da profundidade real.

Figura 4.15: Representação da idade em função da profundidade real do perfil “Campestre I”

Fonte: autor da dissertação

As idades para a profundidade real variaram entre $3,2 \pm 0,6$ anos a $47,9 \pm 0,5$ anos e são consideradas condizentes com a data na qual a represa Poço Fundo entrou em funcionamento (67 anos) (CEMIG,2006).

Determina-se a idade também se utilizando a profundidade corrigida (tabela 4.6), conforme sugerido pelo modelo CRS. A figura 4.16 apresenta o gráfico da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ em função da profundidade corrigida.

Com a correção da profundidade, verifica-se a redução no tamanho do perfil. A concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ novamente apresentou comportamento senoidal ao longo do perfil e a reta obtida para profundidade corrigida se torna mais inclinada, indicando um coeficiente angular negativo e menor se comparado com a reta da figura 4.14. Os valores da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ estão delimitados pela covariância e fornecem um conjunto estatístico com bons resultados, viabilizando a aplicação do modelo CRS.

Figura 4.16: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em razão da profundidade corrigida para o perfil "Campestre I"

Fonte: autor da dissertação

Utilizando-se os coeficientes lineares e angulares da reta calculou-se a idade em função da profundidade corrigida para cada secção do perfil, representada na figura 4.17.

Figura 4.17: Representação da idade em função da profundidade corrigida do perfil "Campestre I"

Fonte: autor da dissertação

As idades obtidas variaram de $2,6 \pm 0,6$ anos a $62,5 \pm 0,5$ anos. Embora as três últimas secções não tenham sido incluídas na análise, os resultados obtidos estão em concordância com a data do início de operação da represa Poço Fundo de 1949 (CEMIG, 2006).

As profundidades real e corrigida e as datas referentes a elas, são apresentadas na tabela 4.13.

Tabela 4.13: Datas referentes as profundidades reais e corrigidas do perfil "Campestre I"

Perfil "Campestre I"			
Prof. real (cm)	Data a partir da prof. real (anos)	Data a partir da prof. corrigida (anos)	Prof. corrigida (cm)
2,00	2014	2014	1,21
4,00	2011	2011	2,62
6,00	2007	2008	4,25
8,00	2004	2004	6,09
10,00	2001	2000	7,93
12,00	1998	1996	9,71
14,00	1995	1992	11,60
16,00	1991	1988	13,65
18,00	1988	1983	15,81
20,00	1985	1979	18,04
22,00	1982	1974	20,38
24,00	1979	1968	22,76
26,00	1975	1963	25,12
28,00	1972	1958	27,44
30,00	1969	1954	29,33

Fonte: autor da dissertação

A taxa de sedimentação para cada secção de profundidade corrigida foi calculada a partir da massa acumulada (equação 3.18, apresentada no item 3.4.5). Os resultados obtidos para a massa acumulada e taxa de sedimentação são apresentados na tabela 4.14.

Tabela 4.14: Resultados de massa acumulada e taxa de sedimentação do perfil “Campestre I”

Amostras	M. acumulada (g cm ⁻²)	Taxa de sedimentação (g cm ⁻² ano ⁻¹)
Camp I - 01	0,37	0,15
Camp I - 02	0,44	0,08
Camp I - 03	0,51	0,06
Camp I - 04	0,57	0,04
Camp I - 05	0,57	0,03
Camp I - 06	0,55	0,03
Camp I - 07	0,59	0,02
Camp I - 08	0,64	0,02
Camp I - 09	0,67	0,02
Camp I - 10	0,69	0,02
Camp I - 11	0,73	0,02
Camp I - 12	0,74	0,02
Camp I - 13	0,73	0,01
Camp I - 14	0,72	0,01
Camp I - 15	0,59	0,01

Fonte: autor da dissertação

Verifica-se que a massa acumulada apresentou pouco acréscimo de massa ao longo do perfil. Esse fato é confirmado pela baixa taxa de sedimentação que variou entre 0,01 a 0,15 g cm⁻² ano⁻¹. A velocidade de sedimentação calculada apresentou valor fixo de 0,47 cm/ano

4.2.4 “Campestre II”

O ponto de coleta desse perfil situa-se fora da influência do planalto de Poços de Caldas, na bacia hidrográfica do rio Machado, a jusante de atividades agrícolas. O perfil sedimentar foi retirado sob uma coluna de água de cerca de 4 metros e apresentou 29 cm, sendo seccionado a cada 2 centímetros, exceto a última secção que apresentou 1 centímetro, totalizando 15 amostras.

Na tabela 4.15 estão descritos os resultados obtidos para a umidade, densidade real, massa total de sólidos e profundidade real, que foram utilizados para correção e obtenção da profundidade de cada secção.

Tabela 4.15: Valores de umidade, densidade real, massa total de sólidos, profundidade real e corrigida do perfil “Campestre II”

Amostras	Prof. real (cm) ^a	M. úmida (g) ^b	M. seca (g) ^b	Umidade (%)	Dens. real (g)	M. sólidos (g) ^b	Prof. corrigida (cm)
Camp II - 01	2,00	83,90	7,70	91	2,20	7,87	0,54
Camp II - 02	4,00	59,02	8,62	85	2,14	12,90	1,42
Camp II - 03	6,00	77,85	13,00	83	2,16	14,94	2,44
Camp II - 04	8,00	103,38	20,00	81	2,09	17,52	3,64
Camp II - 05	10,00	96,84	20,84	78	2,20	19,86	5,00
Camp II - 06	12,00	83,55	19,58	77	2,12	21,79	6,48
Camp II - 07	14,00	102,18	25,61	75	2,04	23,40	8,08
Camp II - 08	16,00	92,86	23,11	75	2,17	23,41	9,68
Camp II - 09	18,00	112,71	28,41	75	2,04	23,56	11,29
Camp II - 10	20,00	83,86	23,74	72	2,20	27,26	13,16
Camp II - 11	22,00	93,38	29,26	69	2,07	30,46	15,24
Camp II - 12	24,00	120,10	39,44	67	2,08	32,24	17,44
Camp II - 13	26,00	99,01	35,72	64	2,02	35,92	19,90
Camp II - 14	28,00	107,27	41,28	62	2,05	39,04	22,57
Camp II - 15	29,00	46,95	18,04	62	2,23	19,85	23,92

^a Incerteza para profundidade real é de 0,25 cm.

^b Incerteza para massa úmida, massa seca e massa total de sólidos é de 0,01g

* Amostra possui 1 cm.

Fonte: autor da dissertação

Analisando a tabela 4.8 nota-se que há flutuações na massa úmida ao longo do perfil, porém a umidade apresenta decréscimo até a última secção. A massa seca aumenta conforme as secções vão se tornando mais profundas. Deve-se considerar que a última secção, caracterizada pela amostra “Camp II – 15”, possui massa úmida e massa seca menores que o restante do perfil, visto que seu volume foi reduzido pela metade.

As secções exibem coloração e densidades reais constantes, indicando que não houve variações na granulometria.

Calcula-se a massa total de sólidos utilizando a umidade e a densidade real, que apresenta aumento ao longo do perfil. Esses dados são usados juntamente com a massa seca para a obtenção da profundidade corrigida.

Comparando a profundidade real com os valores de profundidade corrigida obtidos, constata-se que o achatamento natural do perfil causado pela compactação é pequeno, sendo os valores reais e corrigidos próximos e favoráveis para a aplicação do modelo CRS.

Dando prosseguimento ao estudo, determina-se então a diferença entre a atividade dos radionuclídeos ^{210}Pb e ^{226}Ra (tabela 4.1) e obtém-se o valor do $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$. Plota-se então, o gráfico de $\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ em função da profundidade real (figura 4.6), para todas as secções excetuando-se as amostras “Campestre II – 12” a “Campestre II – 15” que apresentaram $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ negativo.

Figura 4.18: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em razão da profundidade real para o perfil “Campestre II”

Fonte: autor da dissertação

Analisando o gráfico da figura 4.18, constata-se que os valores das concentrações de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ apresentam comportamento linear e a reta inclinada, indicando que o coeficiente angular é negativo. Os valores da concentração de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ estão dentro dos limites da covariância e fornece um bom conjunto estatístico com resultados aceitáveis e, portanto, favoráveis à aplicação do modelo CRS.

Utilizam-se então os coeficientes angulares e lineares da reta para o cálculo das idades reais para esse perfil, representadas na figura 4.19.

As idades obtidas variaram de $4,6 \pm 0,5$ anos a $51,3 \pm 1,0$ anos. Embora as quatro últimas secções não tenham sido incluídas na análise, os resultados obtidos estão em concordância com a data do início de operação da represa Poço Fundo, de 1949 (CEMIG, 2006).

Figura 4.19: Representação da idade em função da profundidade real do perfil “Campestre II”

Fonte: autor da dissertação

O estudo desse perfil foi realizado, utilizando-se também os valores da profundidade corrigida (figura 4.20).

Figura 4.20: Valores de $\ln \text{Pb-210}$ em razão da profundidade corrigida para o perfil “Campestre II”

Fonte: autor da dissertação

Os valores das concentrações de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ apresentam comportamento linear. A reta obtida pelo gráfico é inclinada, evidenciando o coeficiente angular

negativo. As concentrações de $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$ ficam dentro dos limites da covariância e fornecem o conjunto estatístico com resultados aplicáveis ao modelo CRS

Utilizam-se então os coeficientes angulares e lineares da reta para o cálculo das idades para esse perfil, representadas na figura 4.21, em função da profundidade corrigida.

Figura 4.21: Representação da idade em função da profundidade corrigida do perfil “Campestre II”

Fonte: autor da dissertação

As idades obtidas utilizando as profundidades corrigidas variaram de $1,9 \pm 0,5$ anos a $54,0 \pm 1,0$ anos. Analisando os resultados, temos que a correção da profundidade nesse caso, pouco alterou os resultados para a idade da represa Poço Fundo, estando de acordo com a data do início de operação da mesma, em 1949.

As profundidades real e corrigida e as datas referentes a elas, são apresentadas na tabela 4.16.

A taxa de sedimentação para cada secção foi calculada a partir da massa acumulada (equação 3.18, apresentada no item 3.4.5). Na tabela 4.17 são apresentados os resultados obtidos para a massa acumulada e a taxa de sedimentação

Tabela 4.16: Datas referentes as profundidades reais e corrigidas do perfil "Campestre II"

Perfil "Campestre II"			
Prof. real (cm)	Data a partir da prof. real (anos)	Data a partir da prof. corrigida (anos)	Prof. corrigida (cm)
2,00	2012	2015	0,54
4,00	2008	2012	1,42
6,00	2003	2008	2,44
8,00	1998	2004	3,64
10,00	1994	1999	5,00
12,00	1989	1994	6,48
14,00	1984	1988	8,08
16,00	1980	1983	9,68
18,00	1975	1977	11,29
20,00	1970	1970	13,16
22,00	1966	1963	15,24

Fonte: autor da dissertação

Verifica-se que a massa acumulada apresentou pouco acréscimo de massa ao longo do perfil, não variando substancialmente. Consequentemente a taxa de sedimentação foi baixa, variando 0,01 a 0,9 g cm⁻² ano⁻¹. A velocidade de sedimentação obtida foi 0,28 cm ano.

Tabela 4.17: Resultados de massa acumulada e taxa de sedimentação do perfil "Campestre II"

Amostras	M. acumulada (g cm ⁻²)	Taxa de sedimentação (g cm ⁻² ano ⁻¹)
Camp II - 01	0,19	0,10
Camp II - 02	0,32	0,06
Camp II - 03	0,37	0,04
Camp II - 04	0,43	0,03
Camp II - 05	0,49	0,03
Camp II - 06	0,54	0,02
Camp II - 07	0,57	0,02
Camp II - 08	0,57	0,02
Camp II - 09	0,58	0,01
Camp II - 10	0,67	0,01
Camp II - 11	0,75	0,01

Fonte: autor da dissertação

Em conclusão, verifica-se que a utilização do modelo CRS para a determinação das idades dos perfis forneceu resultados satisfatórios e da mesma ordem da grandeza das idades reais das represas, disponíveis na literatura (DME, 2016; CEMIG, 2006). Os valores obtidos para a taxa de sedimentação foram maiores para a represa Bortolan, devido ao assoreamento da represa, à urbanização e ocupação extensiva do solo para fins agrícolas e industriais. O perfil “Bortolan I” não apresentou resultados satisfatórios para a determinação da idade. É importante salientar que a escolha do local de amostragem do perfil é extremamente importante para o êxito da datação utilizando-se $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$. A represa Bortolan apresenta meandros com dinâmica sedimentar diferente do leito principal da represa, razão pela qual a coleta do perfil nem sempre fornece resultados satisfatórios.

4.3 Caracterização dos elementos U, Mn, Mo, Ni, Zn e P nos perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I” e “Campestre”

Tendo em vista as significativas variações obtidas nas concentrações dos elementos Mn, Mo, Ni, P, Zn e U nos sedimentos superficiais (Comissão das Águas, 2012), optou-se no presente trabalho em analisar esses elementos em perfis de sedimentos, para avaliar o comportamento desses elementos ao longo dos anos, verificar possíveis contaminações e definir os níveis basais da região. Os resultados obtidos para a concentração de U, Mn, Mo, Ni, Zn e P nos perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I” e “Campestre II” são apresentados na tabela 4.18.

Analisando a tabela 4.18, verifica-se que as concentrações para os elementos Mn, Mo, Ni, P, U e Zn são maiores nos perfis sedimentares que foram coletados no planalto de Poços de Caldas, “Bortolan/CBA II” e “Bortolan I”, se comparados com o perfil sedimentar “Campestre II”, coletado na represa de Poço Fundo. Tal efeito é esperado, visto que a represa Bortolan se localiza em região urbana e industrializada, diferentemente da represa Poço Fundo que se localiza em uma região predominantemente agrícola.

Tabela 4.18: Concentração de Mn, Mo, Ni, P, U e Zn nos perfis sedimentares “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I” e “Campestre II”

Amostra	Prof. (cm)	Bortolan/CBA II						
		Mn (mg kg ⁻¹)	Mo (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)	P disp. (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹) (Bq kg ⁻¹)		Zn (mg kg ⁻¹)
1	2	1078 ± 11	2,4 ± 0,4	30,6 ± 2,4	4137 ± 218	< 25	< 638	658 ± 80
2	4	1051 ± 20	3,0 ± 0,5	36,5 ± 2,9	3864 ± 215	< 25	< 638	643 ± 78
3	6	636 ± 11	3,3 ± 0,5	19,8 ± 1,6	2410 ± 118	< 25	< 638	446 ± 53
4	8	546 ± 10	3,2 ± 0,5	17,9 ± 1,4	2440 ± 120	< 25	< 638	360 ± 43
5	10	550 ± 10	4,3 ± 0,7	15,3 ± 1,2	2113 ± 103	31 ± 12	791 ± 306	334 ± 40
6	12	449 ± 12	4,4 ± 0,6	16,2 ± 1,4	1963 ± 96	35 ± 12	893 ± 306	288 ± 35
7	14	417 ± 11	4,5 ± 0,7	11,7 ± 1	1437 ± 75	35 ± 10	893 ± 255	241 ± 29
8	16	495 ± 10	5,2 ± 0,8	10,6 ± 1	1407 ± 98	41 ± 12	1046 ± 306	151 ± 31
9	18	609 ± 10	6,4 ± 0,1	16,4 ± 1,5	2027 ± 102	36 ± 12	918 ± 306	355 ± 42

Amostra	Prof. (cm)	Bortolan I						
		Mn (mg kg ⁻¹)	Mo (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)	P disp. (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹) (Bq kg ⁻¹)		Zn (mg kg ⁻¹)
1	2	1871 ± 74	7,5 ± 1,1	21 ± 6	1324 ± 21	< 25	< 638	164 ± 13
2	4	1329 ± 52	5,3 ± 0,9	15 ± 5	1315 ± 15	< 25	< 638	165 ± 14
3	6	1397 ± 55	3,2 ± 0,8	16 ± 5	1472 ± 32	< 25	< 638	169 ± 14
4	8	1792 ± 71	3,8 ± 0,8	18 ± 5	1502 ± 23	< 25	< 638	176 ± 14
5	10	1727 ± 68	3,4 ± 0,8	17 ± 5	1452 ± 45	< 25	< 638	178 ± 14
6	12	1656 ± 65	4,5 ± 0,8	18 ± 5	1532 ± 47	< 25	< 638	198 ± 15
7	14	1635 ± 64	3,8 ± 0,8	16 ± 5	1359 ± 41	< 25	< 638	189 ± 15
8	16	1715 ± 70	3,4 ± 0,8	16 ± 5	1413 ± 12	< 25	< 638	178 ± 14
9	18	1419 ± 56	3,1 ± 0,8	13 ± 5	1215 ± 12	< 25	< 638	155 ± 13
10	20	1255 ± 49	4,0 ± 0,8	16 ± 5	1387 ± 33	< 25	< 638	168 ± 14
11	22	1165 ± 46	3,2 ± 0,8	15 ± 5	1479 ± 33	< 25	< 638	174 ± 14
12	24	1146 ± 45	3,3 ± 0,8	17 ± 5	1588 ± 25	< 25	< 638	194 ± 15
13	26	1169 ± 45	3,4 ± 0,8	15 ± 5	1552 ± 43	< 25	< 638	174 ± 14
14	28	1029 ± 40	3,6 ± 0,8	16 ± 5	1457 ± 48	< 25	< 638	198 ± 15

Amostra	Prof. (cm)	Campestre II						
		Mn (mg kg ⁻¹)	Mo (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)	P disp. (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹) (Bq kg ⁻¹)		Zn (mg kg ⁻¹)
1	2	-	-	-	-	-	-	-
2	4	-	-	-	-	-	-	-
3	6	449 ± 11	<1,0	7,8 ± 0,7	766 ± 63	< 25	< 638	48,2 ± 8
4	8	382 ± 11	<1,0	10,0 ± 0,9	762 ± 63	< 25	< 638	52,9 ± 8
5	10	337 ± 11	<1,0	8,8 ± 0,8	798 ± 65	< 25	< 638	45,1 ± 7
6	12	320 ± 11	<1,0	9,2 ± 0,9	777 ± 69	< 25	< 638	43,1 ± 7
7	14	316 ± 11	<1,0	8,4 ± 0,8	763 ± 63	< 25	< 638	41,3 ± 4
8	16	291 ± 11	<1,0	7,4 ± 0,8	786 ± 63	< 25	< 638	39,4 ± 7
9	18	291 ± 11	<1,0	10,2 ± 0,9	815 ± 63	< 25	< 638	44,4 ± 7
10	20	<250	<1,0	4,3 ± 0,4	724 ± 63	< 25	< 638	30,3 ± 6
11	22	<250	<1,0	9,0 ± 0,9	720 ± 63	< 25	< 638	26,9 ± 5

Fonte: autor da dissertação

Na tabela 4.19 têm-se um quadro resumo apresentando o intervalo de concentração, concentração média e desvio padrão relativo para os elementos Mn, Mo, Ni, P, U e Zn nos perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I” e “Campestre II”.

Tabela 4.19: Quadro resumo dos valores de Mn, Mo, Ni, P, U e Zn nos perfis sedimentares “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I”, “Campestre II”, Wedepohl (1995), UNSCEAR (2000), CONAMA (2009) e Comissão das Águas (2012)

Bortolan/CBA II						
	Mn	Mo	Ni	P	U	Zn
Intervalo (mg kg ⁻¹)	417 - 1078	2 - 6	11 - 37	1407 - 4137	31 - 41	151 - 658
Média(mg kg ⁻¹)	648 ± 12	4 ± 0,5	19 ± 2	2422 ± 127	36 ± 12	386 ± 48
Desv. P. Rel. (%)	38	30	44	40	10	44
Bortolan I						
	Mn	Mo	Ni	P	U	Zn
Intervalo (mg kg ⁻¹)	1029 - 1871	3 - 8	13 - 21	1215 - 1588	<25	155 - 198
Média(mg kg ⁻¹)	1450 ± 57	4 ± 1	16 ± 5	1432 ± 31	-	177 ± 14
Desv. P. Rel. (%)	19	30	11	7	-	7
Campestre II						
	Mn	Mo	Ni	P	U	Zn
Intervalo (mg kg ⁻¹)	291 - 449	<1	4 - 10	720 - 815	<25	27 - 53
Média(mg kg ⁻¹)	341 ± 11	-	8 ± 1	768 ± 64	-	41 ± 7
Desv. P. Rel. (%)	17	-	22	4	-	20
Wedepohl (1995)						
	Mn	Mo	Ni	P	U	Zn
Conc. média mundial (mg kg ⁻¹)	715	1,1	56	757	1,7	65
UNSCEAR (2000) *						
	Mn	Mo	Ni	P	U	Zn
Conc. média mundial (Bq kg ⁻¹)	-	-	-	-	36	-
CONAMA (2009)						
	Mn	Mo	Ni	P	U	Zn
Valores orientadores (Bq kg ⁻¹)	-	30	30	-	-	300
Comissão das Águas(2012) - Ponto 14						
	Mn	Mo	Ni	P	U	Zn
Intervalo (mg kg ⁻¹)	500 - 1500	5 - 430	7 - 13	450 - 1550	25 - 55	160 - 400

* Valores em Bq kg⁻¹

Fonte: autor da dissertação

Na mesma tabela 4.19 são apresentados valores orientadores de preservação para solo da resolução CONAMA n°420 (2009), de concentração média mundial de solo de Wedepohl (1995) e UNSCEAR (2000), e os resultados de concentração em sedimentos superficiais da represa Bortolan (Comissão das Águas, 2012). Os valores de concentração em sedimentos superficiais apresentados se referem ao ponto 14 do relatório da Comissão das Águas, que se localiza próximo ao local de coleta do perfil “Bortolan/CBA II”.

Para melhor interpretação dos resultados, os radionuclídeos ^{226}Ra , ^{210}Pb e U, e os elementos Mn, Mo, Ni, P e Zn foram plotados em razão da profundidade real de cada perfil (figura 4.22).

Figura 4.22: Concentração dos elementos U, ^{226}Ra e ^{210}Pb , Mn, Mo, Ni, P e Zn nos perfis “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I” e “Campestre II” em razão da profundidade real

Perfis Bortolan/CBA II, Bortolan I e Campestre II
Concentração do elemento Ni (mg kg^{-1})

Perfis Bortolan/CBA II, Bortolan I e Campestre II
Concentração do elemento P(dis) (mg kg^{-1})

Perfis Bortolan/CBA II, Bortolan I e Campestre II
Concentração do elemento Zn (mg kg^{-1})

Perfil Bortolan/CBA II

Concentração de U, Ra 226 e Pb 210 (Bq kg^{-1})

Fonte: autor da dissertação

Os valores médios obtidos para Mo nos três perfis sedimentares desse estudo são da mesma ordem de grandeza dos resultados para solo obtidos por Wedepohl (1995) e do valor orientador para preservação da resolução

CONAMA nº420 (2009). Comparando-se os resultados do intervalo de concentração obtidos nos perfis “Bortolan/CBA II” e “Campestre II” com os resultados de concentração no sedimento superficial do relatório da Comissão das Águas (2012), verifica-se que os valores mínimos são da mesma ordem de grandeza, entretanto, o valor máximo obtido no sedimento superficial indica uma contribuição antrópica que não foi verificada nos perfis analisados. Deve-se salientar que as maiores concentrações do elemento molibdênio no relatório da Comissão das Águas, são referentes às coletas efetuadas nos meses de chuvas na região da represa Bortolan. Na figura 4.22 verifica-se que para o elemento Mo, os valores de concentração não variaram significativamente ao longo dos perfis, confirmando que não houve influência antrópica ao longo do tempo.

Os valores de concentração média obtidos para o Ni nos perfis sedimentares “Bortolan/CBA II”, “Bortolan I” e “Campestre II” são menores que o valor médio de Wedepohl e o valor orientador de preservação da resolução CONAMA, sendo da mesma ordem de grandeza dos resultados de sedimentos superficiais, indicando que este elemento não apresenta contribuição antrópica e os valores encontrados podem ser considerados como a linha de base da região. Na figura 4.22 verifica-se que não ocorreu uma variação significativa ao longo dos perfis analisados ao longo do tempo.

Os valores de concentração média obtidos para P nos perfis sedimentares “Bortolan/CBA II” e “Bortolan I” são várias ordens de grandeza maiores que o valor médio obtido por Wedepohl (1995). O perfil “Campestre II” apresentou valor médio de concentração da mesma ordem de grandeza que o valor médio de fósforo para solo de Wedepohl. Comparando-se os resultados do intervalo de concentração obtidos nos perfis “Bortolan/CBA II” e “Bortolan I” com o resultado do relatório da Comissão das Águas, verifica-se que o perfil “Bortolan /CBA II” apresentou maior aporte de P, indicando uma influência antrópica mais acentuada. Na figura 4.22 verifica-se que para o perfil “Bortolan/CBA II” há um acréscimo mais acentuado nas concentrações do elemento P nas secções mais superficiais, nas profundidades de 2 e 4 cm, referentes as datas de 2010 e 2003, respectivamente (tabela 4.4 do item 4.2.2). A partir da profundidade de 6 cm até 14 cm, verifica-se que ocorre um aumento na concentração deste elemento, porém menos acentuado do que nas secções

mais superficiais. No relatório, a Comissão das Águas (2012) aponta que os pontos referentes à represa Bortolan necessitam de maiores investigações para avaliar se houve alguma fonte próxima que possa ter ocasionado essas altas concentrações de P. Em vista disso, deve-se salientar a presença das indústrias de termofosfato Yoorin, a montante do ponto de coleta desse perfil, que está em operação desde a década de 60 e em 2010 foi anexada à Mineração Curimbaba (YOORIN, 2019).

O valor médio de concentração de U para o perfil sedimentar “Bortolan/CBA II” (36 mg kg^{-1} e 918 Bq kg^{-1}) foi superior ao valor de concentração média para solo de WEDEPOHL (1995), de $1,7 \text{ mg kg}^{-1}$ e do valor médio do UNSCEAR (2000), de 35 Bq kg^{-1} . O intervalo de concentração obtido para este perfil é da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos no sedimento superficial. Na figura 4.22, verifica-se que para o perfil “Bortolan/CBA II”, os radionuclídeos ^{226}Ra e U apresentam uma concentração constante ao longo do perfil. Deve-se salientar que o início da operação da indústria de beneficiamento de urânio, INB – Caldas, data de 1982 (INB, 2019).

Ainda na figura 4.22, verifica-se que os valores de concentração de U são superiores à concentração de ^{226}Ra . Esse fato é decorrente da ausência de equilíbrio radioativo do radionuclídeo U com seu produto de decaimento, o ^{226}Ra , no sedimento. Os valores obtidos não variaram ao longo do perfil e podem ser considerados como os níveis basais da região, que apresenta uma anomalia radioativa. Os resultados obtidos nesse estudo corroboram com o relatório da Comissão das Águas, que afirma não haver impacto radiológico na represa Bortolan.

Os resultados de concentração média para o elemento Zn nos perfis sedimentares “Bortolan/CBA II” e “Bortolan I” são superiores aos valores médios mundiais de Wedepohl e aos valores orientadores de preservação da resolução CONAMA; o perfil Campestre II apresentou valores próximos ao valor médio mundial indicando que não ocorreu contribuição antrópica e que os resultados podem ser considerados a linha de base deste elemento na represa Poço Fundo. Os resultados de intervalo de concentração para o Zn no perfil “Bortolan I” são da mesma ordem de grandeza das concentrações obtidas no relatório da Comissão das Águas (2012); O perfil “Bortolan/CBA II” apresenta concentração máxima acima dos resultados de sedimentos superficiais,

indicando uma contribuição antrópica deste elemento. Na figura 4.22, verifica-se que há um maior aporte do elemento Zn até a profundidade de 6 cm; a partir desta profundidade, que corresponde ao ano de 1997, até o final do perfil verifica-se um aporte deste elemento menos acentuada, porém acima dos valores basais.

Analisando os resultados obtidos, pode-se afirmar que os elementos que apresentam contribuições antrópicas na represa Bortolan são o Mn, P e Zn. As maiores concentrações obtidas foram encontradas nas secções superficiais, indicando que o maior aporte ocorreu mais recentemente, a partir do ano de 1997. Os resultados obtidos para U e Ni não variaram ao longo dos perfis e são da mesma ordem de grandeza de dados da literatura para a mesma represa, indicando que esses valores podem ser considerados como níveis basais da região. Em particular, os resultados de concentração de U para a represa Bortolan são elevados, visto que a região do planalto de Poços de Caldas é caracterizada por ser uma anomalia radioativa. O Mo não apresentou variação significativa ao longo dos perfis da represa Bortolan e sua concentração média também é da mesma ordem de grandeza do valor de Wedepohl. Portanto, para esse elemento não foi verificado um aporte antrópico. Para os resultados de concentração dos elementos analisados no perfil da represa de Poço Fundo, pode-se afirmar que todos são próximos às concentrações médias mundiais e inferiores aos resultados da represa Bortolan, indicando que esta represa é mais preservada do que a represa Bortolan.

5. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste estudo foi fazer uso de perfis sedimentares e taxas de sedimentação para reconstituir historicamente a inserção de radionuclídeos e possíveis contaminantes na represa Bortolan ao longo dos anos. Foram analisados 5 perfis do Planalto de Poços de Caldas e 3 perfis da represa Poço Fundo. Nesses perfis foram determinados os teores dos radionuclídeos naturais U, ^{226}Ra e ^{210}Pb e dos elementos Mn, Mo, Ni, Zn e P por meio das técnicas de espectrometria gama, de ICP – AES e espectrofotometria. As técnicas escolhidas foram satisfatórias e apresentaram a sensibilidade necessária para a determinação dos elementos de interesse em amostras ambientais.

A taxa de sedimentação e a idade dos perfis foram avaliadas utilizando-se o modelo CRS. Verificou-se que a utilização do modelo CRS para a determinação das idades dos perfis forneceu resultados satisfatórios e da mesma ordem da grandeza das idades reais das represas Bortolan e Poço Fundo, 60 anos e 67 anos, respectivamente. Os valores obtidos para a taxa de sedimentação foram maiores para a represa Bortolan, devido ao assoreamento da represa, à urbanização e ocupação extensiva do solo para fins agrícolas e industriais.

Analisando os resultados obtidos para a concentração dos elementos U, ^{226}Ra , ^{210}Pb , Mn, Mo, Ni, P e Zn, pode-se afirmar que os elementos que apresentaram contribuições antrópicas na represa Bortolan são o Mn, P e Zn. As maiores concentrações obtidas foram encontradas nas secções superficiais, indicando que o maior aporte ocorreu mais recentemente, a partir do ano de 1997. Os resultados obtidos para U e Ni não variaram ao longo dos perfis e são da mesma ordem de grandeza de dados da literatura para a mesma represa, indicando que esses valores podem ser considerados como níveis basais da região. Em particular, os resultados de concentração de U para a represa Bortolan foram elevados, visto que a região do planalto de Poços de Caldas é caracterizada por ser uma anomalia radioativa. O Mo não apresentou variação significativa ao longo dos perfis da represa Bortolan e sua concentração média também é da mesma ordem de grandeza do valor de Wedepohl. Portanto, para esse elemento não foi verificado um aporte antrópico. Para os resultados de

concentração dos elementos analisados no perfil da represa de Poço Fundo, pode-se afirmar que todos são próximos das concentrações médias mundiais e inferiores aos resultados da represa Bortolan, indicando que esta represa é mais preservada do que a represa Bortolan.

Os resultados obtidos neste estudo permitiram avaliar a inserção dos elementos químicos Mn, Mo, Ni, P, U e Zn no ecossistema da região sob influência das mineradoras, indústrias e atividades agrícolas e definir os níveis basais do planalto de Poços de Caldas.

Os dados obtidos nesse estudo são de grande relevância científica e ambiental, uma vez que a caracterização das concentrações presentes e pretéritas desses elementos na região do planalto de Poços de Caldas poderão servir como linha de base para possíveis impactos ambientais futuros.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, H. L. C. **“Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG”**. Dissertação (mestrado) - Instituto de Geociências, 2008.

ALMEIDA, H. C.; MAZZILLI, B. P.; SOARES, F. V. T. S., TADDEI, M. H. T. **“Evaluation of the sedimentation rate in a sediment profile of Bortolan Dam – Mg, Brazil”**. International Nuclear Atlantic Conference, 2017.

APPLEBY, P. G, **“Tracking Environmental Changes Using Lake Sediments. Chronostratigraphic Techniques in Recent Sediments”**. Kluwer Academic Publishers, 2001.

APPLEBY, P. G.; OLDFIELD, F. **“The calculation of ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment”**. Catena, v. 5, p. 1-8, 1978.

ASTM – A MERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C999 – 05, “Standard Practice for Soil Sample Preparation for the Determination of Radionuclides”**, 2010.

ASTM – A MERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7784 – 12, “Standard Practice for the Rapid Assessment of Gamma-ray Emitting Radionuclides”**, 2013.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1402 – 04, “Standard Guide for High-Resolution Gamma-Ray Spectrometry of Soil Samples”**, 2009.

BAIRD, R. B., EATON, A. D., RICE, E. W. **“Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”**. 23 ED. Washington: American Public Health Association, Pg 4-164, 2017.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **“Usinas da CEMIG. A história da eletricidade em Minas e no Brasil”**. Rio de Janeiro - Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, p. 170 – 171, 2006.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, DEPARTAMENTO DE MEIO AMBIENTE DA SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO URBANO E MEIO AMBIENTE DA PREFEITURA DE POÇOS DE CALDAS, DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO – POÇOS DE CALDAS, DIRETORIA DE RECURSOS MINERAIS DAS INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **“Relatório Técnico da Comissão de Águas”, Avaliação da Qualidade das Águas e Sedimentos das Microbacias do Ribeirão das Antas e do Ribeirão de Caldas no Planalto de Poços de Caldas**, Abril, 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **“Resolução nº 420”** Publicado no DOU nº 249, p. 81-84, 2009.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ELETRICIDADE, disponível em: <<http://www.dme-pc.com.br/institucional/empreendimentos/44-empreendimentos/dme-distribuicao-s-a/229-represa-bortolan>>, acesso em: 21/06/2016 às 14:47

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **“Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry” SW 846 EPA 6010c**, Rev. 01, Fevereiro de 2007

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **“Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils” SW 846 EPA 3051A**, Rev. 01, Fevereiro de 2007

FERREIRA, C. W. S. **“Sedimentação em um Reservatório de Água no Semiárido de Pernambuco”**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Ciências Geográficas e Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2012.

FERREIRA, P. A. L. **“Aplicação do modelo de migração vertical de ^{137}Cs para o cálculo de taxas de sedimentação recentes em ambientes costeiro”**. Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, Área de Oceanografia Química. 2014.

INB, disponível em <www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Caldas>, acesso em: 24/04/2019 às 22:14.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **“Reference Sheet for CRM IAEA-447, Natural and Artificial Radionuclides in Moss-Soil”**. IAEA. Vienna, 5p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **“Reference Sheet for RM IAEA-312, ^{226}Ra , Th and U in Soil”**. IAEA. Vienna, 3p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **“Reference Sheet for RM IAEA-313, ^{226}Ra , Th and U in Sediment”**. IAEA. Vienna, 3p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **“Reference Sheet for RM IAEA-314, ^{226}Ra , Th and U in Sediment”**. IAEA. Vienna, 3p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **“Reference Sheet for RM IAEA-434, Radionuclides in Phosphogypsum”**. IAEA. Vienna, 4p.

LOBATO, E. **“Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral”**. Relatório Técnico 49 - Ministério de Minas de Energia, 2009.

MESTER, Z. e STURGEON, R. **“Sample preparation for Trace element analysis”**, Elsevier, 2003.

MOREIRA, F. H. S. **“Interação entre escoamento superficial, hidrossedimentos e radionuclídeos (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , Th e U) no alto Ribeirão das Antas, Poços de Caldas – MG”**. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Alfenas, 2017.

NAGRA, SKB, UKDOE. **“Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera and the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Brazil”**. Poços de Caldas Report No. 5.

QUIMLAB, disponível em: www.quimlab.com.br/guiadososelementos/manganes.htm, acesso em: 24/04/2019 às 18:47.

RIBEIRO, C. M. C. M. **“Estabelecimento de uma rotina laboratorial para análise química de sedimentos e sua aplicação a sedimentos continentais do Minho (NW Portugal): contribuição para a reconstituição paleoambiental da região”** Tese de mestrado em Ciências do Ambiente - Área de Especialização em Qualidade Ambiental, Portugal, 2006.

ROBBINS, J. A. **“Geochemical and geophysical applications of radioactive lead isotopes”**. Em: NRIAGU, J. O. (Ed.). Biogeochemistry of Lead in the Environment. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1978. p. 285-393.

SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **“Relatório de Qualidade das Águas Superficiais do Estado de São Paulo”**, Apêndice O, Perfis Sedimentares, 2015.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. **“Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais”** – Centro de Tecnologia Mineral, Capítulo 2: Determinação das Densidades de Sólidos e de Polpa. p. 35 – 51, 2007.

SAVVIN, B. **“Analytical use of arsenazo III: Determination of thorium, zirconium, uranium and rare earth elements”**, Talanta, vol 8, pp.673-685, 1961.

SILVA, M. B. F. **“Zircônio”**. Balanço Mineral Brasileiro, Agência Nacional de Mineração, 2001.

SILVA, S. C. **“Metais-traço em sedimentos do reservatório Paiva Castro (Mairiporã-São Paulo): histórico por meio da geocronologia do ^{210}Pb , biodisponibilidade e uma proposta para gestão dos recursos hídricos”**. Tese (doutorado) - Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2013.

SIMMS, A. D.; WOODROFFE, C.; JONES, B. G.; HEIJNIS, H.; MANN, R. A.; HARRISON, J. **“Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs to simultaneously constrain ages and sources of post-dam sediments in the Cordeaux reservoir, Sydney, Australia”**. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 99, Issue 7, July 2008, Pages 1111-1120.

TINOCO, C. P. **“Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de Bauxita”**. Dissertação de mestrado – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 2017.

UNSCEAR - UNITED SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **“Sources and effects of ionizing radiation. New York, Vol.1, Annex B: Exposures from natural radiation source”**, pp.116. 2000.

UNSCEAR - UNITED SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **“Sources and effects of ionizing radiation”**. New York, Vol.1, Annex B: **“Exposures from natural radiation source”**, pp.116. 2000.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **“Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediments for**

Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual", EPA-823-B-01-002, October 2001.

WEDEPOHL, K. H. **"The composition of the continental crust."** *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, n. 7, p. 1217-1232, 1995.

YOORIN, disponível em: < www.yoorin.com.br >, acesso em: 26/02/2019 às 19:13.