

## USO DE SENSORES PROXIMAIS NA AVALIAÇÃO DE SEDIMENTOS DE REPRESA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM VIÇOSA-MG

*USE OF PROXIMAL SENSORS IN THE EVALUATION OF A RESERVOIR SEDIMENTS IN VIÇOSA-MG*

*USO DE SENSORES PROXIMALES EN LA EVALUACIÓN DE SEDIMENTOS DE LA REPRESA DE CAPTACIÓN DE AGUA EN VIÇOSA, MG*

### RESUMO

O município de Viçosa, como grande parte dos municípios brasileiros, apresenta problemas de abastecimento de água. De modo a avaliar a espessura da camada de deposição de uma das barragens do município, foi utilizado radar de penetração do solo (*ground penetrating radar* - GPR). Amostras de sedimentos foram analisadas por espectrometria de fluorescência de raios X (XRF), visando determinar a composição química dos sedimentos. Os dados do GPR indicaram a presença de uma camada de três metros de sedimentos na represa, o que corresponde a uma diminuição substancial do volume original. Metais pesados como Mn, Pb, Cr, Cu e Zn apresentaram valores em níveis potencialmente tóxicos. Tais valores foram atribuídos principalmente à contaminação por aplicação de fertilizantes, corretivos e agrotóxicos. Os teores de P, por sua vez, são atribuídos ao lançamento de efluentes de esgoto na rede de drenagem. Portanto, recomenda-se, para a melhora da quantidade e qualidade da água fornecida à população, medidas que envolvam a recuperação de pastagens degradadas, práticas conservacionistas, manejo racional dos fertilizantes aplicados e investimentos no tratamento de esgoto. O desassoreamento também é visto como uma medida à curto prazo para o aumento da capacidade de armazenamento de água das represas.

**Palavras-chave:** assoreamento. metais pesados. abastecimento de água. erosão. contaminação.

### ABSTRACT

The municipality of Viçosa has experienced problems of water scarcity. In order to evaluate the thickness of the deposition layer at one of the municipal reservoirs, a ground penetrating radar (GPR) was used. Sediment samples were analyzed using X-Ray fluorescence spectrometry (XRF) to determine the chemical composition of the sediments. GPR analysis showed that the reservoir has a sediment layer with three meters of average depth, which corresponds to a significant loss of its initial water storage capacity. Heavy metals such as Mn, Pb, Cr, Cu and Zn were present at potentially toxic levels. These values were mainly attributed to fertilizers, correctives and pesticides contamination. P contents, on the other hand, were related to sewage effluents discharge into the drainage system. Therefore, measures involving the recovery of degraded pastures, soil conservation practices, rational use of fertilizers and infrastructure investment in sewage are recommended to improve quantity and quality of water supplied to population. De-silting is also seen as an efficient short-term measure to increase the water reservoir' storage capacity.

**Keywords:** silting. heavy metals. water supply. erosion. contamination.

### RESUMEN

El municipio de Viçosa, como la mayoría de los municipios brasileños, tiene problemas de suministro de agua. Para evaluar el espesor de la capa de deposición de una de las presas del municipio se utilizó un radar de penetración terrestre (GPR). Las muestras de sedimentos se analizaron mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), con el fin de determinar la composición química de los sedimentos. Los datos del GPR indicaron la presencia de una capa de sedimento de tres metros en la presa, lo que corresponde a una disminución sustancial del volumen original. Los metales pesados como Mn, Pb, Cr, Cu y Zn mostraron valores

-  Rafael Gomes Siqueira <sup>a</sup>
-  Elaine Caliman Sposito <sup>a</sup>
-  Athos Alves Vieira <sup>a</sup>
-  Elton Eduardo Novais Alves <sup>b</sup>
-  Márcio Rocha Francelino <sup>a</sup>
-  Elpídio Inácio Fernandes Filho <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, Brasil

<sup>b</sup> Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil

DOI: 10.12957/geouerj.2021.42429

**Correspondência:**  
elainecalimans@yahoo.com.br

**Recebido em:** 2 maio 2019

**Aceito em:** 19 ago. 2021



a niveles potencialmente tóxicos. Estos valores se atribuyeron principalmente a la contaminación por la aplicación de fertilizantes, correctivos y pesticidas. Los contenidos de P, a su vez, se atribuyen a la liberación de efluentes de aguas residuales a la red de drenaje. Por tanto, para mejorar la cantidad y calidad del agua suministrada a la población, se recomiendan medidas de recuperación de pastos degradados, prácticas de conservación, manejo racional de fertilizantes aplicados e inversiones en tratamiento de aguas residuales. La eliminación de sedimentos también se considera una medida a corto plazo para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua de las represas.

**Palabras-clave:** sedimentación. metales pesados. abastecimiento de agua. erosión. Contaminación.



## INTRODUÇÃO

Cerca de 80% da população mundial está exposta a riscos relacionados à segurança hídrica (BAKKER, 2012). A proteção dos recursos de água doce do mundo requer o diagnóstico das ameaças em escalas global e local (VÖRÖSMARTY et al., 2010). No Brasil, 55% dos municípios poderão ter abastecimento deficitário, decorrente de problemas com a oferta de água dos mananciais, seja na quantidade, na qualidade, na capacidade dos sistemas produtores e/ou por falta de infraestrutura e investimentos (ANA, 2010). Entre tais municípios, inclui-se Viçosa, localizado na Zona da Mata de Minas Gerais (MG), que vem apresentando graves problemas de abastecimento de água nos últimos anos, além de histórico associado a problemas urbanos, como enchentes, em decorrência de eventos pluviométricos extremos e mau uso do solo (BATISTA; RODRIGUES, 2010).

De 2014 a 2017, Viçosa apresentou precipitações acumuladas abaixo da média histórica (INMET, 2018), o que resultou em fortes períodos de estiagem. Como consequência, o reservatório artificial do município não conseguiu suprir a demanda de sua população, ocasionando crises de abastecimento hídrico. De acordo com Gomes et al. (2012), a alteração da vazão dos mananciais de Viçosa ao longo dos anos é evidente, com registros históricos de vazão do Ribeirão São Bartolomeu de  $720 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , nos períodos de estiagem, durante as décadas de 70 e 90, e de  $360 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  atualmente. Desta forma, nos últimos anos, o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município foi obrigado a adotar, de forma frequente, medidas emergenciais para a superação de tais crises, como o racionamento do fornecimento de água e o uso do volume morto, além de campanhas de conscientização e fiscalização contra o uso irracional da água (VIANA et al., 2016).

A população atual estimada de Viçosa é de 78.381 habitantes (IBGE, 2017), com uma população flutuante de cerca de 22.000 estudantes (UFV, 2017), o que corresponde a um aumento, não planejado, de quase 30.000 habitantes, desde 1991, decorrente, principalmente, do crescimento do número de estudantes e servidores vinculados à Universidade Federal de Viçosa (UFV). Entre 1975 e 2007, o fornecimento de água teve um aumento da ordem de 850% no município de Viçosa (RODRIGUES et al., 2010), diretamente relacionado com a federalização da universidade e o seu consequente crescimento. O crescimento desordenado da cidade de Viçosa e o aumento da pressão sobre a bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, manancial de limitações naturais ao abastecimento em função do reduzido tamanho (5.438 hectares), contribuem para a diminuição do volume de água nas represas de captação.

Além das prolongadas estiagens e o aumento da demanda populacional, outro fator que interfere diretamente no abastecimento hídrico dos municípios brasileiros é o assoreamento dos reservatórios, devido à erosão do leito dos rios, transporte dos sedimentos e deposição nas represas, principalmente em áreas com acentuada remoção da vegetação e uso inadequado do solo (CARVALHO et al., 2000). A construção de barragens e a formação de reservatórios tendem a alterar as características sedimentológicas dos cursos



d'água e o equilíbrio do fluxo hídrico à montante (CABRAL, 2005). As barragens geram redução da velocidade da corrente, provocando a deposição gradual dos sedimentos carregados pelo curso d'água e o assoreamento, o que diminui gradativamente a capacidade de armazenamento dos reservatórios, podendo inviabilizar a operação do seu aproveitamento (CARVALHO et al, 2000).

Além da diminuição do volume da água utilizável, os sedimentos de represas também adquirem grande importância ambiental, por incorporarem compostos químicos potencialmente tóxicos ao consumo humano, como metais pesados (TORRES et al., 2015). Tais metais tendem a ser lançados nos canais fluviais através de efluentes domésticos, industriais, mineração e insumos agrícolas, tendo como destino final o fundo das represas de captação (MENDES et al., 2013). De acordo com Silva et al. (2017), os sedimentos de represas são potencialmente prejudiciais por representarem repositórios de contaminantes tóxicos prontamente disponíveis. Assim, relacionam-se à continuidade da degradação ambiental, mesmo quando presentes em baixos níveis na coluna d'água e ainda depois de cessada a descarga de poluentes no corpo d'água receptor (POMPÊO et al., 2013).

Diante da situação comprometedor da qualidade de vida das populações abastecidas por tais reservatórios assoreados, a caracterização física e química dos sedimentos em represas de captação de água é de fundamental importância no planejamento e na manutenção da segurança hídrica dos municípios afetados pela escassez de água, com destaque para o volume da camada de sedimentos assoreados e a identificação de elementos químicos potencialmente tóxicos. Para tal, ressalta-se a importância da utilização de técnicas modernas capazes de atender essas demandas da sociedade de forma rápida e eficiente, que se apresentam como alternativas viáveis e econômicas às análises convencionais mais dispendiosas e complexas.

Dentre essas técnicas, pode-se citar o radar de penetração do solo (*ground penetrating radar*-GPR), ou Georadar, que consiste em um sensor proximal com grande potencial nos estudos ambientais. Essa técnica é utilizada para os estudos em profundidade de rochas, solos e sedimentos, e permite a realização de levantamentos de diferentes dados ao longo da subsuperfície, de forma não invasiva e não destrutiva (CEZAR et al., 2010). O princípio físico do método consiste na emissão de ondas eletromagnéticas que são geradas através de um curto pulso de alta frequência e que, por sua vez, são repetidamente radiadas para dentro do terreno por uma antena transmissora (CAUSSE; SÉNECHAL, 2006). Em estudos pedológicos, o Georadar possibilita a análise de propriedades físicas e morfológicas, destacando-se a profundidade do solo, teor de umidade, presença de camadas compactadas ou ainda estruturas artificiais (DOURADO et al., 2003; PAIXÃO et al., 2006; CEZAR et al., 2012; UCHA et al., 2002).

Outro sensor proximal com crescente aplicação nas ciências ambientais é o espectrômetro de fluorescência de raios X (XRF), que permite a análise química quantitativa ou semiquantitativa, multielementar, de forma não destrutiva, em diversos tipos de amostras geológicas, pedológicas, vegetais



e/ou hídricas (WEINDORF et al., 2014). O sistema funciona baseado na medida das intensidades de raios X característicos emitidos pelos elementos químicos presentes na amostra, quando devidamente excitada por radiação de alta energia (RIBEIRO et al., 2017). A técnica apresenta um custo relativamente baixo, rapidez na aquisição de dados, grande reprodutibilidade e versatilidade (WEINDORF et al., 2014). Na Ciência do Solo, o XRF tem sido muito aplicado na análise da composição química total do solo (WASTOWSKI, 2010; ZHU et al., 2011; SHAND; WENDLER, 2014; SHARMA, 2014; STOCKMAN, 2016) e, em particular, da contaminação por metais pesados em solos e sedimentos (CLARK et al., 1999; CARR et al., 2008; RADU; DIAMOND, 2009; WU et al., 2012).

Desta forma, objetivou-se, no presente trabalho: avaliar a espessura dos sedimentos assoreados e a alteração da capacidade de armazenamento de água de uma das represas de captação de água de Viçosa, a partir da técnica GPR; e avaliar a composição química dos sedimentos da represa, a partir da análise de XRF, com destaque para a possível presença de metais pesados em níveis tóxicos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em uma das barragens de captação de água, localizada no campus da UFV – MG (20°46'15"S, 42°52'25"O; 20°46'30" S; 42°52'30"O) (Figura 1), no município de Viçosa, mesorregião da Zona da Mata de Minas Gerais. Tal represa, denominada Lagoa 1 (VIANA et al., 2016), consiste no barramento mais a jusante do curso fluvial do Ribeirão São Bartolomeu, sendo uma das duas represas responsáveis pelo fornecimento de água para as estações de tratamento ETA I e ETA III, que abastecem a zona urbana de Viçosa e o campus da UFV (SAAE, 2015).

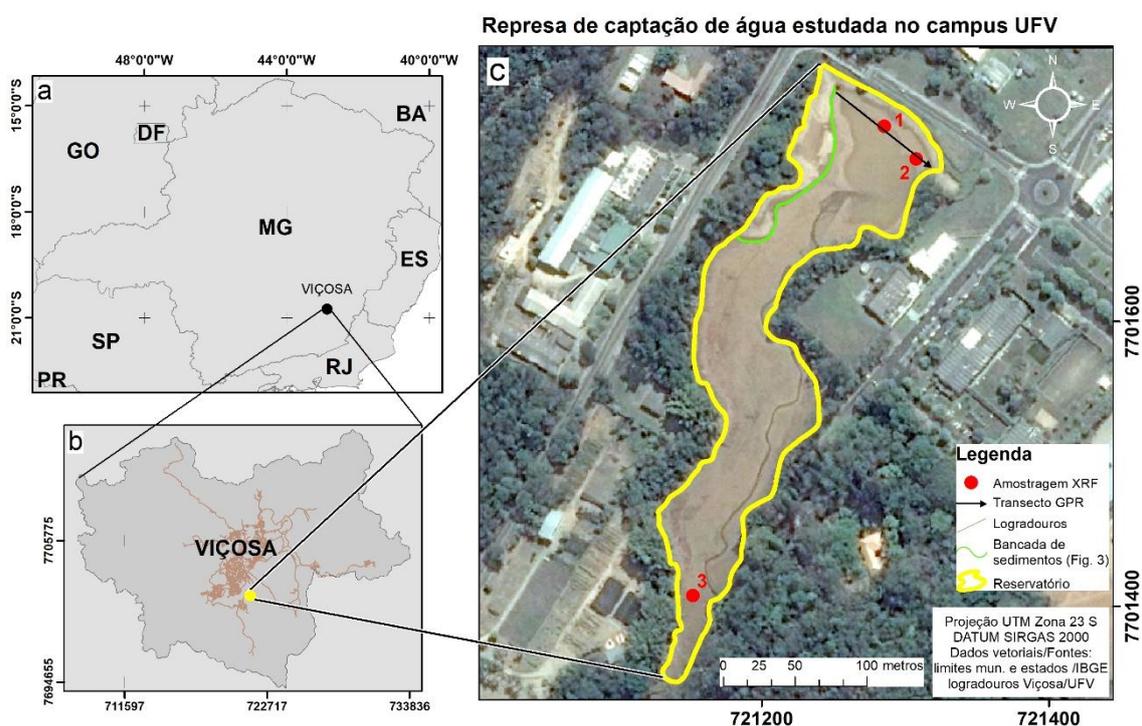
As represas que compõem o sistema de barramentos localizado no campus da UFV foram construídas na década de 1960, com o objetivo de garantir a maior disponibilidade de água durante os períodos de estiagem, reduzindo a pressão direta sobre o Ribeirão São Bartolomeu, além de finalidades paisagísticas e de equalização das vazões, com o amortecimento dos picos de vazão durante as cheias (SAAE, 2015).

O clima na bacia do Ribeirão São Bartolomeu é caracterizado como CWa, de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.200 mm e forte sazonalidade: verões úmidos e quentes e invernos frios e secos (PORTES et al., 2009). A vegetação original dominante é a floresta estacional semidecídua, típica das áreas não-serranas do bioma Mata Atlântica (CARVALHO et al., 2008).

O relevo é forte-ondulado e montanhoso, típico dos Mares de Morros, com pedoformas côncavo-convexas distribuídas na paisagem, e com uma densidade de drenagem de 4,5 km km<sup>-2</sup>, indicando intensa dissecação do relevo por canais de primeira ordem (CORRÊA, 1984). A represa se localiza em um ambiente de terraço, pedoforma típica do

Planalto de Viçosa, cujos solos principais são os Cambissolos Háplicos Tb distróficos e Argissolos Vermelho-Amarelo, ambos sendo originados a partir do embasamento cristalino gnáissico dominante na região. Nas partes mais altas, como os topos de morros e vertentes convexas, há o predomínio de Latossolos Vermelho-Amarelo (NUNES et al., 2001).

**Figura 1.** (a) Localização de Viçosa no estado de Minas Gerais; (b) Localização da área de estudo no município de Viçosa-MG; (c) Represa de captação de água “Lagoa 1” no campus da Universidade Federal de Viçosa, representada no ano de 2017, no qual ocorreu significativa escassez hídrica. Transecto percorrido com o GPR e pontos de coleta para a análise com XRF também são representados.



Fonte: Google Earth, adaptado pelos autores.

### Radar de Penetração do Solo (GPR)

A prospecção eletromagnética dos sedimentos da represa de captação de água da UFV foi realizada com o auxílio do equipamento GRP fabricado pela empresa GSSI®, modelo SIR-3000, com antenas de 200 MHz blindadas e com orientação e espaçamento fixos. Antes da passagem do GPR, fez-se a calibração do odômetro eletrônico acoplado à roda, para a tomada de dados conforme a distância percorrida pelo equipamento.

Foi realizada uma passada na borda norte da represa no mês de setembro de 2017, gerando um transecto com comprimento de 84 m (Figura 1). De acordo com a frequência da antena, o GPR foi programado para a prospecção na profundidade aproximada de 5 m. A faixa de tempo programada, de acordo com a profundidade de penetração, foi de



94 ns, enquanto foram definidas 512 amostras por traço. A constante dielétrica definida foi igual a 8, de acordo com os teores de umidade dos sedimentos da represa.

Para o processamento dos radargramas, utilizou-se o programa RADAN 7<sup>o</sup>, em que foram realizados processamentos visando a melhoria da qualidade dos dados. Foi inserido ganho de exibição, no valor de 6, para facilitar a localização de alvos de amplitude mais baixa. A correção da posição em relação ao tempo zero corresponde à remoção das linhas superficiais geradas pela onda direta, ou seja, aquela energia que parte direto da antena emissora para a receptora sem passar pelo solo.

Para remoção do plano de fundo (*Background Removal*) foi aplicado filtro de ruídos de alta frequência horizontais, os quais são distribuídos de forma constante nos dados e resultantes de interferências locais. Esse filtro age de forma a suprimir os sinais lineares e constantes, a fim de acentuar as respostas nas variações horizontais entre os dados de imageamento. Aplicou-se o filtro de Deconvolução (*Deconvolution*), com o objetivo de remover ruídos de reflexões múltiplas ou repetitivas que sobreponham os dados do radargrama, degradando sua resolução. Esses ruídos são decorrentes principalmente em solos com alto teor de argila e também saturados, como é o caso dos sedimentos encontrados na represa.

Foi também aplicado o filtro Migração (*Migration*), que tem a função de reposicionar os refletores em sua localização real em subsuperfície, permitindo corrigir sua profundidade. Foi adotado o método de Kirchhoff, também conhecido como método de empilhamento de difração (*diffraction stack*), o qual tem como princípio a somatória das amplitudes que descrevem a hipérbole, transportando o resultado para o seu ápice. Em adição, permite a definição da velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas no solo e, conseqüentemente, a determinação do valor da permissividade dielétrica, conforme a equação abaixo (ANNAN, 2009).

$$k = \left( \frac{C}{V} \right)^2$$

Onde:  $V$  é a velocidade das ondas eletromagnéticas no solo, em  $m\ ns^{-1}$ ,  $C$  é a velocidade das ondas no espaço livre,  $\approx 3,0 \times 10^8\ m\ s^{-1}$  ( $0,3\ m\ ns^{-1}$ ) e  $k$  é a constante dielétrica do meio de propagação.

### Coleta e preparo das amostras

Foram definidos três pontos de coleta de amostras de sedimentos da represa, sendo dois deles localizados na borda norte e um terceiro localizado na parte sul (Figura 1). A amostragem dos sedimentos foi realizada no mesmo dia da aquisição dos dados com o GPR e as coletas foram feitas com o auxílio do trado holandês com extensores, até na profundidade de 100 cm em cada ponto, em intervalos de 10 cm. As áreas de borda foram selecionadas para coleta de



amostras e leitura com GPR, por representarem as únicas localidades com leito seco o suficiente para a realização adequada dos trabalhos. Considerando o curto tempo (poucos dias) de esvaziamento total da represa durante o período de estiagem e as limitações logísticas das amostragens em diferentes profundidades, três pontos de coleta foram escolhidos para os objetivos propostos, considerando a largura do local.

As 30 amostras coletadas foram secadas em estufa durante 48 horas, à temperatura de 105 °C. Após secagem, as amostras foram destorroadas e homogeneizadas com auxílio de um almofariz de ágata e passadas em peneira de 200 mesh, para maior eficiência no processo de prensagem e melhor homogeneidade da amostra. Para cada amostra, subamostras de 0,5 g foram utilizadas para a confecção de pastilhas com diâmetro de 15 mm e espessura aproximada de 2 mm (ALVES et al., 2015). Este processo foi realizado com o auxílio de uma prensa hidráulica ajustada a uma pressão aplicada de 3 t cm<sup>-2</sup>, durante 2 min, por pastilha. O fracionamento da amostra pela peneiração e a sua compactação em pastilhas finas são processos fundamentais na preparação das amostras para o XRF, por contribuir significativamente para a diminuição do efeito de matriz física durante a análise (CAMPOS et al., 2015). As pastilhas foram acomodadas em gabaritos e então submetidas à análise de fluorescência de raios X na Sala de Instrumentação do Departamento de Solos da UFV.

### Espectrometria de Fluorescência de Raios X

Essa análise foi realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva com microfeixe ( $\mu$ ED-XRF modelo 1300, Shimadzu, Kyoto, Japão), equipado com tubo de Rh e um detector de Si(Li). O  $\mu$ ED-XRF é capaz de identificar e quantificar elementos químicos com número atômico maior que do Na e menor que do U. Em cada pastilha foi analisada uma área retangular de 12 mm<sup>2</sup>, compreendendo um total de 1200 pontos (30 x 40 pontos), com espaço de 100  $\mu$ m entre cada ponto, e o tempo total de 500 s por pastilha, conforme Guerra et al. (2013). Os parâmetros instrumentais do XRF estão listados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetros instrumentais do  $\mu$ ED-XRF

Parâmetros instrumentais	Condições de operação
Diâmetro de irradiação	50 $\mu$ m
Distância de trabalho	1,5 mm
Tempo de análise por pastilha	500 s
Região espectral analisada	1–40 keV
Atmosfera de medida	Ar
Voltagem elétrica	50 keV
Corrente elétrica	50 $\mu$ A

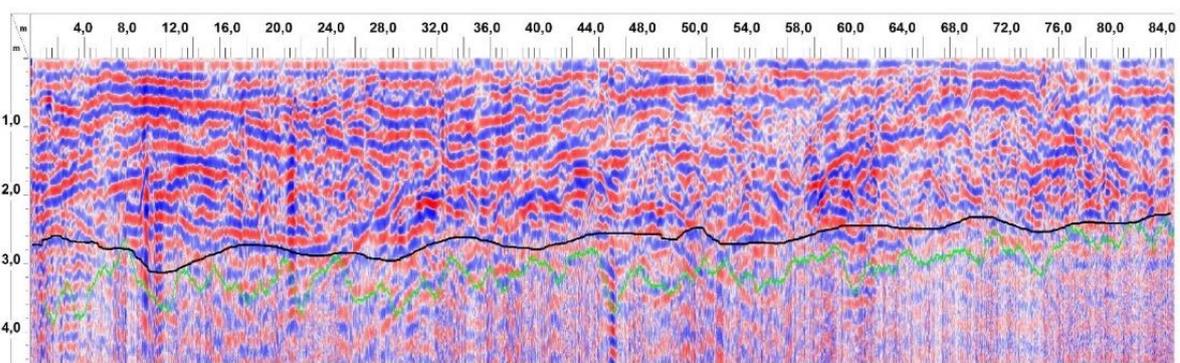
Fonte: Elaborado pelos autores.

A quantificação dos elementos químicos presentes nas amostras dos sedimentos foi realizada pelo método semi-quantitativo, baseado nos parâmetros fundamentais (FP), utilizando-se o carbono (fórmula CHO) como elemento químico para o fechamento da massa final. Para a determinação dos coeficientes de sensibilidade do método FP, foram utilizadas amostras de referência certificadas 2709a, 2710a, e 2711a do National Institute of Standards and Technology (NIST). Entre os elementos químicos detectados, foram considerados aqueles com intensidade líquida ( $I_{Net}$ ) de fluorescência de raios X superior a sete vezes a raiz quadrada do background (limite de detecção =  $I_{Net} > 7 \times \sqrt{BG}$ ). A determinação do limite de detecção foi realizada pelo programa do  $\mu$ ED-XRF da Shimadzu. Pelo fato de o oxigênio não ser detectado pelo equipamento utilizado e por ser o elemento químico mais abundante na matriz do solo, os resultados dos teores dos elementos químicos determinados foram expressos na forma dos respectivos óxidos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a interpretação do radargrama (Figura 2), observou-se que o máximo de alcance da leitura variou entre 3 e 4 m de profundidade (linha verde no radargrama). Abaixo desta profundidade, verificou-se aumento do ruído do sinal, provavelmente pela atenuação do sinal devido ao elevado teor de umidade nestas profundidades. A linha preta na Figura 2 representa a espessura da camada de sedimentos da represa, com uma profundidade média de 3 m. Tal profundidade também foi verificada em campo, com a utilização do trado com extensores em diferentes pontos do transecto percorrido com o GPR, utilizando-se, assim, estas observações como referência para a interpretação do radargrama gerado.

**Figura 2.** Radargrama do transecto da camada de sedimentos obtido com o GPR (Eixos: x – distância horizontal percorrida com o GPR, em metros; y – profundidade, em metros).



Fonte: Dados da pesquisa, elaborado pelos autores.

É importante ressaltar que esta é a profundidade da camada na borda norte da represa, acreditando-se que a sua espessura seja consideravelmente maior nestas seções marginais, onde a deposição (assoreamento) ocorre de forma mais intensa. Este fato também foi observado por Viana et al. (2016), que mostrou que as partes mais rasas da Lagoa 2 (vizinha à Lagoa 1 no campus da UFV) localizam-se nas suas bordas, devido à maior altura dos sedimentos depositados nestas áreas durante o processo de assoreamento.

Isto ocorre porque, além da deposição de sedimentos transportados por suspensão através dos canais à montante, o assoreamento é favorecido nas bordas das represas pela erosão das margens produzida pelo vento e pelas ondas em ambientes lacustres (CABRAL, 2005), como pode ser observado nas margens da Lagoa 1, onde rasgos de erosão são comuns. Tal erosão é mais expressiva no setor noroeste da represa, onde o assoreamento mostra-se mais avançado e a altura dos sedimentos é maior, consistindo em partes mais rasas da coluna d'água (Figura 3).

A represa possui uma área aproximada de 30.000 m<sup>2</sup>, se enquadrando na classe de reservatório de pequeno porte (CARVALHO, 2000; FARIA et al., 2017). Considerando que a profundidade média atual da represa analisada é de 2,5 metros, isto representaria um volume total em torno de 75.000 m<sup>3</sup>. O desassoreamento permitiria que o volume ultrapassasse o dobro desse valor, visto os valores de sedimentação encontrados pela prospecção. Viana et al. (2016) citam que a profundidade das represas do campus da UFV vem diminuindo progressivamente ao longo dos anos, devido ao processo contínuo de deposição dos sedimentos.

**Figura 3.** Vista da porção norte da represa durante período de estiagem. No plano mais próximo da imagem, observa-se a borda norte, com a localização do transecto do GPR e dos pontos de amostragem 1 e 2. À direita observa-se uma bancada de sedimentos mais claros se destacando acima do leito médio (bordeada em verde), onde o assoreamento das margens é mais acentuado devido à erosão e o nível da água é mais raso.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores.



Verifica-se que a situação das represas da UFV possivelmente reflete, em escala reduzida, as condições de uma parte considerável dos reservatórios de médio a grande porte do território nacional, onde tem-se observado uma redução drástica do volume útil das represas, devido ao processo de assoreamento. Perdas da capacidade original de armazenamento têm sido contabilizadas, variando de 38 a 65 % em reservatórios nacionais, comprometendo o abastecimento hídrico e a geração de energia (COELHO,1993; CABRAL et al., 2008; VANZELA et al., 2014).

Shen e Lai (1996) reconhecem a remoção dos sedimentos por meios mecânicos como uma medida eficiente de redução do assoreamento. No entanto, é importante notar que tal medida só poderia ser aplicada em períodos de esvaziamento dos reservatórios, visando a não contaminação da água pelo revolvimento dos sedimentos, e também após a avaliação dos possíveis riscos de mobilização de poluentes retidos nos sedimentos. Os autores também ressaltam a necessidade da redução da quantidade de sedimentos que entram nos reservatórios através do controle da erosão das bacias à montante (CABRAL, 2005). Tal medida seria de fundamental importância na bacia do São Bartolomeu, uma vez que o assoreamento é ainda um processo ativo nas represas de abastecimento de água de Viçosa (Viana et al., 2016).

Apesar de ser um processo natural, potencializado pelos barramentos produzidos ao longo dos canais fluviais, o assoreamento observado nas represas de captação do Ribeirão São Bartolomeu possui forte influência antrópica devido ao intenso desmatamento da vegetação natural da bacia. Tal desmatamento foi ativado, principalmente, pela implantação da atividade cafeeira na Zona da Mata mineira, no final do século XIX, que se estendeu como principal atividade econômica da região até a segunda metade do século XX (VALVERDE, 1958).

Com o declínio da economia cafeeira em nível nacional e o êxodo rural condicionado pelo crescimento dos polos urbanos regionais, as lavouras de café na bacia do São Bartolomeu deram lugar às pastagens que hoje correspondem a 25 % da área total da bacia (PORTES et al., 2009). As áreas de pastagens ocupam diferentes níveis na paisagem, desde o topo das elevações até as áreas de inundação dos cursos d'água (PIMENTEL et al., 1982).

De acordo com Nascimento et al. (2006), pastagens, de forma geral, são altamente eficientes quanto à redução dos processos de erosão, pois, quando conservadas, proporcionam uma cobertura vegetal contínua no solo, protegendo-o do impacto direto da água da chuva. No entanto, como observado por Chagas et al. (2009), as pastagens presentes na bacia do São Bartolomeu tendem a apresentar, em geral, alto nível de degradação, com baixo vigor e baixa densidade, associado com presença de invasoras e/ou cupins. Nas zonas mais degradadas, as pastagens tendem a apresentar significativas áreas de solos descobertos, denominadas de "pelados". Tal situação é refletida nos graus de fragilidade ambiental moderado a forte identificados por Portes et al. (2009) para a bacia citada.

Vários são os fatores que contribuem para a degradação das pastagens no município de Viçosa, sendo o manejo inadequado e as deficiências nutricionais dos solos como os principais fatores para sua baixa produtividade (NASCIMENTO et al., 2006). O assoreamento, como observado no presente trabalho, é uma das principais consequências desta condição, pois a ausência de proteção adequada aos solos da bacia favorece a erosão pela desagregação do solo e o aumento do



escoamento superficial concentrado da água da chuva, em detrimento da infiltração e dos fluxos superficiais lentos e difusos (GOMES et al., 2012).

A compactação do solo devido o sobrepastejo é outro processo antrópico extremamente prejudicial que tende a anteceder o assoreamento, uma vez que leva ao aumento da densidade do solo e à redução da macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica (AZEVEDO; SVERZUT, 2007). Isto culmina na redução da taxa de infiltração do solo, predispondo-o à erosão (SILVA FILHO et al, 2010).

Em relação à caracterização química dos sedimentos, verifica-se que, em todos os três pontos analisados, há a predominância do Si, Al e Fe, o que reflete a composição da matriz do solo. No caso dos solos tropicais, como no Planalto de Viçosa, estes elementos estão associados basicamente à aluminossilicatos 1:1, com destaque para a caulinita, e às formas oxidicas de Al e Fe, como gibbsita e goethita/hematita, respectivamente (KER, 1997; NUNES et al., 2001).

A aplicação da XRF possibilitou a caracterização geoquímica dos sedimentos da represa (Tabela 2). Os valores de  $Fe_2O_3$  são compatíveis com os teores de Fe dos solos mesoféricos da região, principalmente nos Argissolos dos terraços fluviais (CARVALHO FILHO, 1989). Em ambientes saturados de água, como nas camadas de sedimentos da represa, o Fe também pode ser encontrado em formas oxidicas menos cristalizadas, como é o caso da ferridrita, ou ainda na sua forma reduzida ( $Fe^{2+}$ ). Além da grande presença na estrutura dos minerais, o Al também se destaca como o cátion mais abundante no complexo de troca dos solos da região de Viçosa, devido ao elevado intemperismo e características notadamente ácidas (CORRÊA, 1984).

**Tabela 2.** Teores dos elementos químicos identificados pelo XRF.

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
		g kg <sup>-1</sup>							
Média	Ponto 1	274.95	0,80	147.82	2.72	12.44	19.64	357.48	16.73
	Ponto 2	268.07	0,79	156.01	2.30	11.19	15.67	347.02	16.92
	Ponto 3	212.04	15,39	131.13	2.40	10.78	16.30	279.20	13.94
	Total	251.69	5,66	144.99	2.47	11.47	17.20	327.90	15.86
		%							
Coeficiente de variação	Ponto 1	3.05	13.29	6.05	11.44	18.01	17.95	2.56	4.07
	Ponto 2	5.48	22.91	8.19	14.68	10.28	33.27	5.87	8.68
	Ponto 3	49.24	186.46	52.66	39.90	27.47	23.01	51.43	52.65
	Total	19.25	74.22	22.30	22.00	18.59	24.74	19.95	21.80
		g kg <sup>-1</sup>							
Média	Ponto 1	0.39	0.15	0.94	0.14	1.15	0.03	0.37	0.11
	Ponto 2	0.37	0.15	0.76	0.15	1.65	0.03	0.44	0.10
	Ponto 3	0.38	0.15	1.06	0.15	1.43	0.02	0.43	0.11
	Total	0.38	0.15	0.92	0.15	1.41	0.03	0.41	0.10
		%							
Coeficiente de variação	Ponto 1	13.88	9.45	36.04	24.06	35.94	61.69	24.90	17.25
	Ponto 2	10.61	13.87	53.68	51.32	42.09	64.98	16.32	24.06
	Ponto 3	67.79	13.91	61.19	49.73	41.23	41.59	38.14	18.01
	Total	30.76	12.41	50.31	41.70	39.75	56.09	26.45	19.77

Fonte: Dados da pesquisa, elaborado pelos autores.



Dentre os metais básicos, verifica-se maiores valores para o Na. Entretanto, isto pode estar relacionado com o fato do limite de detecção do Na pelo XRF ser limitado, devido ao baixo peso atômico deste elemento, com tendência de superestimação da sua concentração. Por outro lado, valores altos de sódio são comuns em sedimentos, associados principalmente ao lançamento de águas residuais e esgoto doméstico na rede de drenagem (MEDEIROS, 2005). O Mg foi o segundo elemento mais comum nos dois pontos de amostragem localizados no setor norte da represa (Pontos 1 e 2), enquanto o Ca predomina na parte sul (Ponto 3), principalmente nas camadas inferiores, onde ultrapassa  $20 \text{ g kg}^{-1}$ .

Diferentemente do Si, Al e Fe, cuja maior presença está associada à composição de minerais secundários neoformados a partir do intemperismo dos materiais de origem, o Ca, o Mg e o K tendem a ser encontrados, principalmente, no complexo trocável dos solos da região de Viçosa, caracterizando-se como elementos solúveis do sistema natural (NUNES et al., 2001). A presença de metais alcalinos e alcalino terrosos na água, como Ca, Mg, K e Na, possuem fundamental importância na nutrição dos organismos celulares, sendo que a sua presença é considerada positiva para a manutenção da qualidade da água de represas e reservatórios (SAMPAIO, 2007). Além do intemperismo dos minerais primários constituintes do material de origem, tais metais também podem ter sido adicionados aos solos e posteriormente carregados pela água pluvial, através de fertilizantes e aplicações de corretivos, como no caso da calagem, que pode fornecer Ca e Mg em diferentes proporções (RIBEIRO et al., 1999).

Dentre os metais pesados de interesse ambiental, o elemento que apresentou os maiores teores foi o Mn. Durante o período de estiagem em 2017, quando os níveis de água dos mananciais do município de Viçosa apresentaram valores críticos, foram observadas altas concentrações de Fe e Mn nas águas do Rio Turvo Sujo, também utilizadas para o abastecimento da zona urbana de Viçosa. Tais concentrações acarretaram na coloração amarelada observada na água disponibilizada à população no citado ano. O  $\text{Fe}^{2+}$ , assim como o  $\text{Mn}^{2+}$ , possuem comportamento semelhante na água, e apesar de não serem diretamente tóxicos, alteram propriedades físicas como cor e sabor quando oxidados ao entrarem em contato com o  $\text{O}_2$  dissolvido (CPRM, 1997). A oxidação do Fe pode ser catalisada também por bactérias ferro-oxidantes, formando precipitados e incrustações em tubulações, prejudicando as operações de distribuição de água.

Em geral, no município de Viçosa, os elementos Fe e Mn são de fontes naturais, provenientes, principalmente, das rochas máficas que originam os solos da região, com predomínio dos biotita-gnaisses, ricos em biotita, piroxênios e anfibólios (NUNES et al., 2001). O mesmo também ocorre com o Ti, metal não encontrado nas águas fluviais devido à sua baixa solubilidade, porém, que se concentra em solos muito intemperizados, principalmente compondo o mineral anatásio (KER, 1997), e também presente em concentrações razoáveis nos sedimentos da represa analisada.



Outros metais pesados, como Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, também foram identificados em quantidades expressivas, superiores aos valores de referência para áreas residenciais, conforme a resolução CONAMA N° 460 (CONAMA, 2009). Os valores de Cr, Cu, Pb e Zn foram superiores aqueles encontrados por Sampaio (2017) durante o período seco no reservatório Billings, em São Paulo. Tais metais traços, apesar de sua baixa concentração na natureza, são considerados tóxicos e podem se acumular nos organismos (POMPÊO et al., 2013). Em altas concentrações, podem causar danos ao sistema respiratório, como pneumonia, bronquite e asma, além de outros problemas de saúde, como anemia, hipertensão, disfunção renal e problemas neurológicos (SAMPAIO, 2007).

Levando em consideração a natureza rural da bacia estudada e as informações presentes na literatura sobre a concentração de elementos traços nos fertilizantes utilizados nas culturas agrícolas (AMARAL SOBRINHO et al., 1992), considera-se que, na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, a principal fonte de contaminação seja a utilização de fertilizantes e corretivos nas propriedades rurais a montante da represa. Conclusões semelhantes para a contaminação de sedimentos foram obtidas em outras bacias hidrográficas rurais do país (BRITO et al., 2004; VARGAS et al., 2018). Em relação aos fertilizantes, Vargas et al. (2018) destacam a composição química dos fertilizantes NPK, com ênfase para os metais pesados Zn, Mn, Pb, Cu e Cr, os mesmos encontrados em quantidades significativas nos sedimentos da represa da UFV.

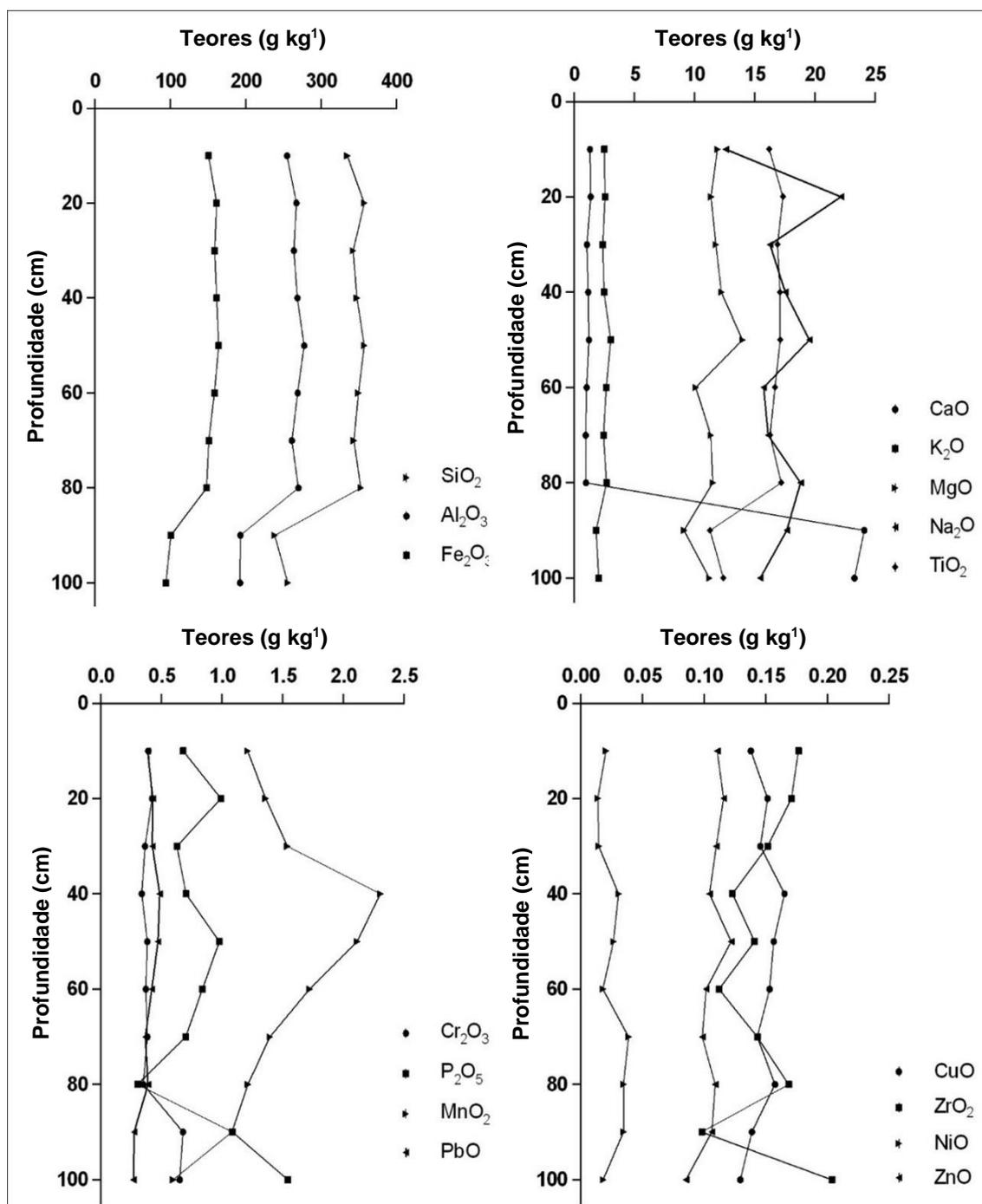
O P apresentou altos valores e, levando-se em consideração sua virtual ausência no gnaisse predominante em Viçosa, credita-se os seus altos teores à sua utilização no meio agrícola, através de fertilizantes e adubos orgânicos, erosões do solo desprovido de cobertura e, principalmente, despejo do esgoto doméstico e rural no Ribeirão São Bartolomeu e afluentes. De acordo com o SAAE (2015), apenas cerca de 2.000 habitantes de Viçosa possuíam suas residências atendidas com tratamento de esgoto até a data analisada, o que corresponde a menos de 2 % da população total, sendo a maioria dos efluentes lançados no sistema de drenagem, justificando os altos teores de P depositados nas represas de captação.

A adsorção de P pelos óxidos de Fe, principalmente pela goethita (CORRÊA, 1984; KER, 1997), e o seu transporte conjunto pelos canais fluviais, pode também estar contribuindo para os altos valores encontrados, assim como também acontece com os metais pesados. Por sua vez, os fosfatos presentes nos sedimentos também podem ser responsáveis pela imobilização de metais pesados, como observado por Liu et al. (2007) ao constatar a redução da mobilidade do Pb, Cu, Ni e Cr em solos pela aplicação de fertilizantes fosfatados.

Verifica-se variação pouco significativa dos teores de elementos químicos na maior parte das camadas analisadas, com destaque para os 80 cm iniciais (Figura 4). A única exceção é o Mn, cujos maiores valores se concentram entre 30 e 60 cm. Entretanto, nos 20 cm mais profundos, os teores dos elementos químicos variaram significativamente. Os teores de Si, Al e Fe diminuíram abruptamente a partir dos 80 cm. Teores de outros elementos, como Ti, Mg e K, também apresentaram redução, embora em menor intensidade. O contrário foi verificado para o Ca, que aumentou 50 vezes nestes mesmos 20 cm, enquanto aumentos significativos também foram observados nos teores de P e Zr. A observação do coeficiente de variação destes elementos evidencia que as principais mudanças ocorrem no ponto localizado no sul da represa – Ponto 3,

onde, por exemplo, o coeficiente de variação do Si, Al e Fe fica em torno de 50 % e o do Ca é superior a 140 %, indicando as variações abruptas.

**Figura 4.** Teores de elementos químicos determinados pela XRF em função da profundidade da camada de sedimentos. Fonte: Dados da pesquisa, elaborado pelos autores.



Destaca-se que a composição química dos sedimentos de fontes hídricas não significa, necessariamente, o mesmo nível de contaminação das águas em contato. Porém, a presença de metais pesados em



concentrações elevadas nestes sedimentos representa um potencial latente de contaminação destas fontes, conforme observado por Brito et al. (2004), uma vez que o material depositado no fundo é constantemente reprocessado, podendo tornar-se novamente disponível em solução (SILVA et al., 2017).

De forma geral, considera-se que os dois problemas tratados, assoreamento e contaminação dos sedimentos, estão interligados, pois ao se discutir os potenciais motivos de tais problemas, verificou-se acentuada relação. Como exemplo mais claro dessa afirmativa, pode-se citar o problema da erosão no meio rural, que além de carrear sedimentos para os canais e potencializar o assoreamento, também transporta, conjuntamente com as partículas do solo, os nutrientes do solo já empobrecido, levando à necessidade cada vez maior de uso de fertilizantes e corretivos. Tais fertilizantes acabam contribuindo, ainda mais, com a contaminação da rede de drenagem através dos metais pesados, seja pela lixiviação natural, irrigação excessiva ou pela própria erosão dos solos degradados.

## CONCLUSÕES

O uso dos sensores proximais possibilitou caracterizar aspectos físicos e químicos dos sedimentos acumulados na represa estudada. O GPR estimou a presença de cerca de 3 m de sedimentos acumulados na represa. A sua remoção dobraria a capacidade de reserva de água, sendo uma medida de grande valia diante da condição de escassez hídrica que o município atravessou nos anos recentes.

A análise com XRF possibilitou caracterizar quimicamente os sedimentos da represa, discriminando os elementos de fontes naturais daqueles de origem antrópica potencialmente tóxicos, permitindo indicar suas fontes prováveis. Metais traços como Pb, Cr, Cu, e Zn, foram identificados em níveis preocupantes, com risco de contaminar a água da represa, o que coloca em risco a saúde da população. Sua origem está diretamente associada com o manejo inadequado de fertilizantes e corretivos agrícolas no meio rural, principalmente através de fertilizantes NPK, largamente utilizados. Os altos teores de P estão associados, por sua vez, com o lançamento do esgoto doméstico na rede de drenagem, considerando a histórica precariedade do sistema de tratamento de esgoto do município. Por fim, os altos teores de Mn justificam a ocorrência da elevação na turbidez observada na água fornecida à população no ano de 2017.

Verifica-se que os agravos associados à segurança hídrica de Viçosa, no que condiz à quantidade e à qualidade da água disponível, remetem a problemas histórico-estruturais da bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu que, ao se interligarem, interferem na qualidade da água fornecida pelo sistema público à população do município.



## REFERÊNCIAS

- ALVES, E.E.N.; ROCHA, P.A.; SIEBENEICHLER, E.A.; COSTA, L.M.; VERGÜTZ, L.; SCHAEFER, C.E.G.R., 2015. Determinação da massa por área mínima de amostras de solo e vegetal para análise no  $\mu$ -EDX. In: Simpósio Mineiro de Ciência do Solo, 3, 2015. **Anais...Viçosa-MG**, 2015. p. 28–30
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, C. de; VELLOSO, A. C. X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 271-276. 1992.
- ANNAN, A.P. Electromagnetic principles of ground penetrating radar. In: JOL, H.M (org.). **Ground penetrating radar: theory and applications**. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. p. 4-40.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil – Abastecimento Urbano de Água**. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, Brasília, 2010. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br>. Acesso em: 24 de fev. de 2018.
- AZEVEDO, E. C.; SVERZUT, C. B. Alterações dos atributos físicos e químicos do solo sob pastagem no sudoeste do estado de Mato Grosso. **Revista Agricultura Tropical**, v. 9, p.1-17. 2007.
- BAKKER, K. Water security: research challenges and opportunities. **Science**, v. 337, n. 6097, p. 914-915. 2012.
- BATISTA, M.S.; RODRIGUES, R. A. Análise climática de Viçosa associada à ocorrência de eventos pluviométricos extremos. **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 36, p. 52-67. 2010.
- BRITO, L.T.L.; SRINIVASAN, V.S.; SILVA, A.S.; GHEYI, H.R.; GALVÃO, C.O.; HERMES, L.C. Metais pesados nos solos e nos sedimentos depositados nas fontes hídricas da bacia hidrográfica do rio Salitre. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 33. **Anais...**, São Pedro-SP, 2004.
- CABRAL, J.B.P. Estudo do processo de Assoreamento em reservatórios. **Caminhos de Geografia**, v. 6, n. 14, p. 62-69. 2005.
- CABRAL, J.B.P.; FERNANDES, L.A.; SCOPEL, I.; BECEGATO, V.A.; FIORI, A.P. Avaliação do estado de assoreamento dos reservatórios de Cachoeira Dourada (GO/MG). **Sociedade e Natureza**, v. 21, n.1, p. 97-119. 2009.
- CAMPOS, N.V.; GUERRA, M.B.B.; MELLO, J.W.V.; SCHAEFER, C.E.G.R.; KRUG, J.F.; ALVES, E.E.N.; AZEVEDO, A.A. Accumulation and spatial distribution of arsenic and phosphorus in the fern *Pityrogramma calomelanos* evaluated by micro X-ray fluorescence spectrometry. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 30, p. 2375-2383. 2015.
- CARR, R.; ZHANG, C.C.; MOLES, N.; HARDER, M. Identification and mapping of heavy metal pollution in soils of a sports ground in Galway City, Ireland, using a portable XRF analyser and GIS. **Environmental Geochemistry Health**, v. 30, p. 45–52. 2008.
- CARVALHO, N.O. Assoreamento de reservatórios – consequências e mitigação dos efeitos. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 4. **Anais...**, Santa Maria-RS, p. 1-22. 2000.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA J.R.; SANTOS, P. M. C; LIMA, J. E. F. W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 185p. 2000.
- CARVALHO, L. M. T.; LOUZADA, J. N. C.; OLIVEIRA, A. D. Flora. In: SCOLFORO, J.R.S; CARVALHO, L.M.T.; OLIVEIRA, A.D. (Org.). **Zonamento Ecológico Econômico do Estado de Minas Gerais: Componentes Geofísico e Biótico**. 1ed. Lavras: Editora UFLA, 2008, v. 1, p. 137-150.
- CARVALHO FILHO, A. **Caracterização mineralógica, química e física de solos de duas unidades de paisagem do Planalto de Viçosa - MG**. 114 p., Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1989.
- CLARK, S.; MENRATH, W.; CHEN, M.; RODA, S.; SUCCOP, P. Use of a field portable X-ray fluorescence analyzer to determine the concentration of lead and other metals in soil samples. **Annals of Agricultural and Environmental Medicine**, v. 6, p. 27–32. 1999.
- CEZAR, E.; NANNI, MR.; CHICATI, M.L.; FABRO, F.D.; HATA, F.T.; OLIVEIRA, R.B. Uso de sistema GPR (Ground Penetrating Radar) na avaliação de atributos de um solo sob plantio de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n.2, p. 291-297. 2010.
- CEZAR, E.; NANNI, M.R.; CHICATI, M.L.; OLIVEIRA, R.B. Emprego de GPR no estudo de solos e sua relação com métodos laboratoriais. **Semina**, v. 33, n.1, p. 979-988. 2012.
- CAUSSE, E.; SÉNÉCHAL, P. Model-based automatic dense velocity analysis of GPR field data for the estimation of soil properties. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 3, n.2, p. 169-176. 2006.
- CHAGAS, C.S.; VIEIRA, C.A.O.; FERNANDES FILHO, E.I.; JÚNIOR, W.C. Utilização de redes neurais artificiais na classificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 319-327. 2009.



- COELHO, M.P. **Análise do processo de assoreamento do reservatório de Americana – SP.** 63 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Estadual Paulista. Campus de Rio Claro. 1993.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **RESOLUÇÃO Nº 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009.** Publicado no DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- CPRM. **Hidrogeologia:** conceitos e aplicações. ABHD- UFPE, 1997.
- CORRÊA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do planalto de Viçosa, MG.** 1984. 87 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1984.
- DOURADO, J.C.; CHANG, H.K.; MALAGUTTI FILHO W.; BRAGA, A.C.O. Utilização de radar de penetração no solo na Detecção de Estruturas Artificiais rasas no solo. **Geociências**, v. 22, p. 75-81. 2003.
- FARIA, S. H.; RODRIGUES, D.D.; MEDEIROS, N.G.; ARANHA, P.R.A. Avaliação de radargramas batimétricos para cálculo de volume de represa empregando o classificador “FCLASS2”. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 2, p. 234-251. 2017.
- PORTES, R. C.; BEZERRA, N.R.; SILVA, C. H. C.; SPINOLA, D. N.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; BASTOS, R. K. X. Determinação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-Minas Gerais, Brasil, através de Geoprocessamento e análise multicritério. In: ENCUESTRO DE GEOGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 12, 2009, Montevideo. 2009.
- GOMES, M. A.; LANI, J. L.; COSTA, L. M.; PONTES, L. M.; FIGUEIREDO, N. A.; BARDALES, N.G. Solos, manejo e aspectos hidrológicos na bacia hidrográfica dos Araújos, Viçosa – MG. **Revista Árvore**, v. 36, n.1, p. 93-102. 2012.
- GUERRA M.B.B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; CARVALHO, G.G.A.; SOUZA P.F.; SANTOS JÚNIOR D.; NUNES, L.C.; KRUG, F.J. Evaluation of micro-energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry for the analysis of plant materials. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 28, p. 1096–1101. 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Portal IBGE – Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. © 2017 IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística | v4.3.8.1. Acesso em 26 de fev. 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA-INMET – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 13 de mar. 2018.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, v.5, n.1, p. 17-40. 1997.
- LIU, J.; DUAN, C.; ZHU, Y.; ZHANG, X.; WANG, C. Effect of chemical fertilizers on the fractionation of Cu, Cr and Ni in contaminated soil. **Environmental Geology**, v.52, p. 1601-1606. 2007.
- MEDEIROS, S.S.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A.; NEVES, J.C.L.; MATOS, A.T.; SOUZA, J.A.A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: Estudo das alterações químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, 603-612. 2005.
- MENDES, M.A.M.; LEITE, M.G.P.; LENA, J.C. Assinatura geológica e influência do uso e da ocupação do solo na geoquímica de águas e sedimentos da bacia do ribeirão Caraça, Catas Altas, MG. **Geochimica Brasiliensis**, v.27, n.2, 120-129. 2013.
- NASCIMENTO, M.C.; RIVA, R.D.D.; CHAGAS, C.S.; OLIVEIRA, H.; DIAS, L.E.; FERNANDES FILHO, E.I.; SOARES, V.P. Uso de imagens do sensor ASTER na identificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 196-202. 2006.
- NUNES, W.A.G.A.; KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; GOMES, F.H. Relação Solo-Paisagem-Material de origem e gênese de alguns solos no Domínio do “Mar de Morros”, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 341-354. 2001.
- PAIXÃO, M.S.G.; PRADO, L.R.; DIOGO, L.A. Análise do emprego do GPR para estimar o teor de umidade do solo a partir de um estudo na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n.2, p. 189-198. 2006.
- PIMENTEL, J.C.M.; JÚNIOR, D.; RESENDE, M. Caracterização das pastagens naturais das pedopaisagens côncava e convexa do Planalto de Viçosa, Minas Gerais. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v.11, n.1, p. 168-187. 1982.
- POMPÊO, M.; PADIAL, P. R.; MARIANI, C. F.; SILVA, S. C.; CARLOS, V. M.; DA SILVA, D. C. V. R.; PAIVA, T. C. B.; BRANDIMARTE, A. L. Biodisponibilidade de metais no sedimento de um reservatório tropical urbano (reservatório Guarapiranga–São Paulo (SP), Brasil): há toxicidade potencial e heterogeneidade espacial?. **Geochimica Brasiliensis**, v.27,n.2, p. 104-119. 2013.



- RADU, T.; DIAMOND, D. Comparison of soil pollutions determined using AAS and portable XRF techniques. **Journal of Hazardous Materials**, v. 171, p. 1168–1171. 2009.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes de Minas Gerais; 5ª Aproximação**. 1ªed. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG). Viçosa, 1999. 359p.
- Ribeiro, B.T.; Silva, S.H.G.; Silva, E.A.; Guilherme, L.R.G. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n.3, p. 245-254. 2017.
- RODRIGUES, J.M.; RODRIGUES R.A.; JUSTINO, F.B.; COSTA, L.C.; AMORIM, M. C. Efeitos locais de larga escala na dinâmica climática do município de Viçosa – Minas Gerais. **Sociedade e Natureza**, v.22, n.3, p. 593-610. 2010.
- SAMPAIO, S. A. **Quantificação de metais em águas e sedimentos do reservatório Billings por fluorescência de raios X com reflexão total e radiação Síncrotron (SR-TXRF)**. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2007.
- SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE VIÇOSA - SAAE. Relatório de diagnóstico da situação e de seus impactos nas condições de vida, utilizando Sistema de indicadores sanitários, epidemiológicos, ambientes e socioeconômicos – Plano Municipal de Saneamento Básico, Viçosa–MG. 2015Disponível em: <http://www.saaevicosa.mg.gov.br/>. Acesso em 4 de jan. 2019.
- SHAN, C.A.; WENDLER, R. Portable X-ray fluorescence analysis of mineral and organic soils and the influence of organic matter. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 42, p. 31-42. 2014.
- SHARMA, A.; WEINDORF, D.C.; MAN, T.; ALI ALDABAA, A.A.; CHAKRABORTY, S. Characterizing soils via portable x-ray fluorescence spectrometer: 3. Soil reaction (pH). **Geoderma**, v. 232-234, p. 141-147. 2014.
- SHEN, H.W.; LAI, J. S. Sustain reservoir useful life by flushing sediment. **International Journal of Sediment Research**, v.11, n.3, p. 11-17. 1996.
- SILVA, E; SOUZA, N.F.A.; VIANA, Z.C.V.; MARINHO, P.S.; SANTOS, V.L.C.S. Concentração de metais em sedimentos da lagoa do Parque Metropolitano de Pituáçu, Bahia, Brasil. **Holos**, v. 4, p. 159-170. 2017.
- SILVA FILHO, E. P.; COTTAS, L. R.; MARINI, G. B. S. Avaliação da compactação dos solos em áreas de pastagens e florestas em Porto Velho-Rondônia. **Boletim de Geografia**, v. 8, p.145- 155. 2010.
- STOCKMANN, U.; CATTLE, S.R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, v. 139, p. 220-231. 2016.
- TORRES, A.M.; BASTOS, M.L.L.; BOAVENTURA, G.R.; LICHT, O.A.B.; KERN, D.C.; JUNIOR, G.M.; FRAZÃO, F.J. L.; COSTA, M.L.; BORBA, R.P.; FIGUEIREDO, B.R. A geoquímica dos sedimentos e solos. In: SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S.; OLIVEIRA, P.E. Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto. Ed. Holos, 382p. 2005.
- UCHA, J.M.; BOTELHO M.; VILAS BOAS, G.S.; RIBEIRO, L.P.; SANTANA, P.S. Uso do radar penetrante no solo (GPR) na investigação dos solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 373-380. 2002.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA-UFV. Relatórios institucionais (UFV em Números) – Edição 2017. Disponível em: <http://www.ppo.ufv.br>. Pró-Reitoria de Planejamento e Orçamento, 2017. Acesso em: 26 fev. 2018.
- VALVERDE, O. Estudo Regional da Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia**, v.20, n.1, p. 3-79. 1958.
- VANZELA, L.S.; GRECCO, D.LG.; COSTA NETO, J.N.; SANTOS, G.O. Produção de sedimentos e assoreamento da represa municipal de Fernandópolis-SP. **Engenharia Agrícola**, 2014, v.34, n.5. 2014.
- VARGAS, T.; ROISENBERG, A.; PULGATTI, F.H. Contaminação de sedimentos de fundo nas bacias de captação de abastecimento público de Caxias do Sul, RS. **Geociências-UNESP**, v.37, n.2, p. 331-346. 2018.
- VIANA, L.J.F.; SAITO, Y.K.; BENHAME, M. R.; FERREIRA, I.O. Análises do acúmulo de sedimentos em um represamento do Ribeirão São Bartolomeu no município de Viçosa-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 6, 2016, Recife – PE. 2016.
- VÖRÖSMARTY, C.J.; MCINTYRE, P.B.; GESSNER, M.O.; DUDGEON, D.; PRUSEVICH, A.; GREEN, P. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, n.7315, p. 555-561. 2010.
- WASTOWSKI, A.D.; ROSA, M.G.; CHERUBIN, M.R.; RIGON, J.P.G. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrofotometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, v. 33, p. 1449-1452. 2010.



WEINDORF, D.C.; BAKR, N.; ZHU, Y. Advances in portable X-ray fluorescence (pXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. **Advances in Agronomy**, v. 128, p. 1- 45. 2014.

WU C-M.; TSAI, H-T.; YANG K-H.; WEN J-C. How reliable is X-ray fluorescence (XRF) measurement for different metals in soil contamination? **Environmental Forensics**, v. 13, p. 110-121. 2012.

ZHU, Y.; WEINDORF, D.C.; ZHANG, W. Characterizing soils via portable x-ray fluorescence spectrometer: 1. Soil texture. **Geoderma**, v. 167-168, p. 167-177. 2011