

Características do solo na APA Carste de Lagoa Santa (MG) e seu papel na infiltração de potenciais contaminantes

Soil characteristics in the Lagoa Santa karst (MG) and its role in the infiltration of potential contaminants

Rogério Tadeu de Souza

Doutor em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais
Pós-Doutorando em Geografia – Tratamento da Informação Espacial
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Brasil
rtssouza1@gmail.com

Jarbas Lima Dias Sampaio

Professor do Departamento de Geologia da
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
jarbasdias@ufmg.br

Resumo

Os solos podem ser conceituados de acordo com o ramo da ciência que o estuda. Entretanto, é ponto comum o fato de que é formado sob influência do clima, organismos, material de origem, relevo e tempo e o fato de recobrirem as rochas, mantendo a vida animal e vegetal na biosfera. Em muitos casos, o material de origem ou rocha matriz é fator de formação de maior importância. No entanto, quando se trata de solos sobre o carste, sua formação ainda é motivo de controvérsias. No caso dos solos da APA Carste de Lagoa Santa, percebe-se que são solos profundos, de estrutura granular e ultra fina granular. Também se apresentam em blocos cuja relação sólido-vazios é bem diferenciada dos solos de influência direta dos carbonatos. Na região, em geral, possuem pH majoritariamente ácido que, aliados à dominância da caulinita e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio na mineralização da fração argila, proporcionam taxas de infiltração da ordem de 10^{-3} a 10^{-5} cm.s^{-1} , fato que pode levar a um risco adverso muito maior às águas subterrâneas. Assim sendo, é objetivo desta pesquisa a discussão desses pontos.

Palavras-chave: Solos, Carste, Lagoa Santa, Infiltração.

Abstract

Soils can be conceptualized according to the branch of science that studies it. However, the fact that it is formed under the influence of climate, organisms, parental material, relief and time and the fact that they cover rocks, maintaining animal and plant life in the biosphere, is a common point. In many cases, the source material or matrix rock is a significant formation factor. However, when it comes to karst soils, their formation is still a matter of controversy. In the case of the soils of the Lagoa Santa karst, it is noticed that they are deep soils, with granular structure and ultra-fine granular. They are also presented in blocks whose solid-void ratio is well-differentiated from soils with the direct influence of carbonates. In the region, in general, they have mostly acid pH which, together with the dominance of kaolinite and iron and aluminium oxy-hydroxides in the mineralization of the clay fraction, provide infiltration rates in the range of 10^{-3} to 10^{-5} cm.s^{-1} , a fact that can lead to a much greater adverse risk to groundwater. Therefore, this research aims to discuss these points.

Keywords: Soils, Karst, Lagoa Santa, Infiltration.

1. INTRODUÇÃO

O *carste* é tradicionalmente reconhecido como um tipo especial de paisagem onde coexistem cavernas e um extenso sistema de água subterrânea desenvolvido, especialmente, sobre rochas altamente solúveis como o calcário e o mármore, por exemplo (FORD; WILLIAMS, 2007). Por todo o mundo, as áreas cársticas apresentam um importante papel para a sociedade, pois são fontes importantes de água potável podendo, também, estar associadas a boas terras cultiváveis.

No que se refere especificamente à água subterrânea, o aquífero cárstico apresenta grande complexidade na recarga, armazenamento e transmissão hídrica, tornando-o mais vulnerável a potenciais contaminações. São, também, altamente sensíveis às pressões antrópicas.

Em muitas regiões cársticas pelo mundo, a cobertura pedológica é pouco espessa e, assim, apresenta baixa atenuação natural de potenciais contaminantes. A recarga concentrada nas dolinas e sumidouros auxiliam neste processo que apresenta uma alta vulnerabilidade natural. A vulnerabilidade natural da APA Carste de Lagoa Santa, associada à importância econômica, histórica, ambiental e paisagística justifica a necessidade dessa pesquisa.

Em termos gerais, o potencial de um aquífero ser adversamente alterado depende essencialmente da suscetibilidade da camada não saturada (ou zona vadosa) apresentar maior ou menor proteção à contaminação, especialmente pela presença de solo. Segundo Selker (1999), quase metade da água subterrânea existente no mundo é gerada pela infiltração por meio da zona vadosa. Nesta camada podem ser desencadeados vários processos de atenuação da contaminação por meio de processos físicos, químicos e biológicos característicos de cada local. Sendo assim, fatores tais como mineralogia da zona vadosa, espessura, infiltração e reações tais como oxidação, precipitação e dissolução são essenciais para a avaliação da vulnerabilidade de um aquífero. No entanto, nota-se que vários métodos de avaliação de um aquífero ser contaminado não levam em consideração tais fatores. O solo desempenha um papel importantíssimo no que se diz respeito à proteção a contaminação das águas subterrâneas, haja vista que é nessa camada que ocorre os processos de atenuação de potenciais contaminantes (SOUZA *et al.*, 2020).

Assim sendo, a pesquisa tem como objetivo promover uma análise dos tipos de solos existentes na área de estudo e correlacionar suas propriedades físico-químicas com a infiltração de potenciais contaminantes em subsuperfície.

2. METODOLOGIA

A área de estudo abrange aproximadamente 240 km² englobando parte da APA Carste de Lagoa Santa, além de porções a norte, noroeste e leste desta região, abrangendo parte dos

municípios de Lagoa Santa, Prudente de Morais, Pedro Leopoldo, Funilândia, Matozinhos e Confins e os principais acessos a área de estudos são a MG-010 (a leste) e a MG-424 (a oeste).

O solo é um importante parâmetro que favorece a atenuação de contaminantes em diferentes métodos para a avaliação da vulnerabilidade de um aquífero. Sendo assim, a coleta de amostras de solos e análise dos parâmetros de CTC, mineralogia, carbono orgânico, pH e granulometria é de fundamental importância para auxiliar na etapa de avaliação da infiltração, haja vista que a zona vadosa é a principal responsável pela proteção do aquífero.

Foi realizada pesquisa bibliográfica para identificação dos estudos que serviriam como ponto de partida para os trabalhos de amostragem da pesquisa. Destacaram-se os trabalhos de Herrmann (1998), Viana *et al.* (1998), Shinzato (1998), Tannús (1994; 1992) e Meneses (2003).

A amostragem realizada nesta pesquisa foi efetivada com a coleta em 23 pontos dentro da área de estudo. A área foi dividida em quadrículas 3 km x 3 km, com no mínimo um ponto de coleta em cada uma. Para o ponto de amostragem optou-se por selecionar os solos (1º nível categórico) de maior representatividade contido em cada quadrícula.

Dentro dos limites da APA Carste de Lagoa Santa, utilizou-se o mapa de solos de Herrmann (1998), em escala 1:50.000. Já as porções norte, noroeste e oeste utilizaram informações do mapeamento pedológico realizado pela UFV (2010), em escala 1:650.000. De acordo com Shinzato (1998), os solos regionais são profundos e o principal tipo é o Latossolo (MENESES, 2003; HERMANN *et al.*, 1998; SHINZATO, 1998). A Figura 1 mostra o mapa de solos elaborado e os pontos de amostragem selecionados para a pesquisa.

A análise de Carbono Orgânico (CO) foi realizada por meio do método *Walkley e Black*.

As amostras submetidas à análise de Difração de Raio X (DRX) foram secas em estufa na temperatura de 60°C por 24 horas, pulverizadas em gral com pistilo de porcelana. Os resultados foram interpretados segundo as distâncias interplanares e as intensidades dos picos nos difratogramas. A amostra de referência utilizada foi o padrão do banco de dados PDF-2 Release 2010 do ICDD (*International Centre for Diffraction Data e o Software X'PertHighScore*), versão 2011. O equipamento utilizado foi um difratômetro *Philips-PANalytical*, modelo *EMPYREN*, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e monocromador.

Para as análises de CTC, pH e análise granulométrica, seguiram-se os procedimentos metodológicos utilizados pelo laboratório e transcritos do manual elaborado por Camargo *et al.* (2009).

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) a pH 7,0 (CTC a pH 7,0) foi calculada pela soma dos teores de Ca^{++} , Mg^{+} , K^{+} , Al^{+++} e H^{+} , determinados na análise. Esta representa a quantidade máxima de cargas negativas que o solo possui e que poderiam permitir a troca por cátions. A CTC a pH 7,0 é, portanto, um valor calculado a partir dos valores individuais dos cátions.

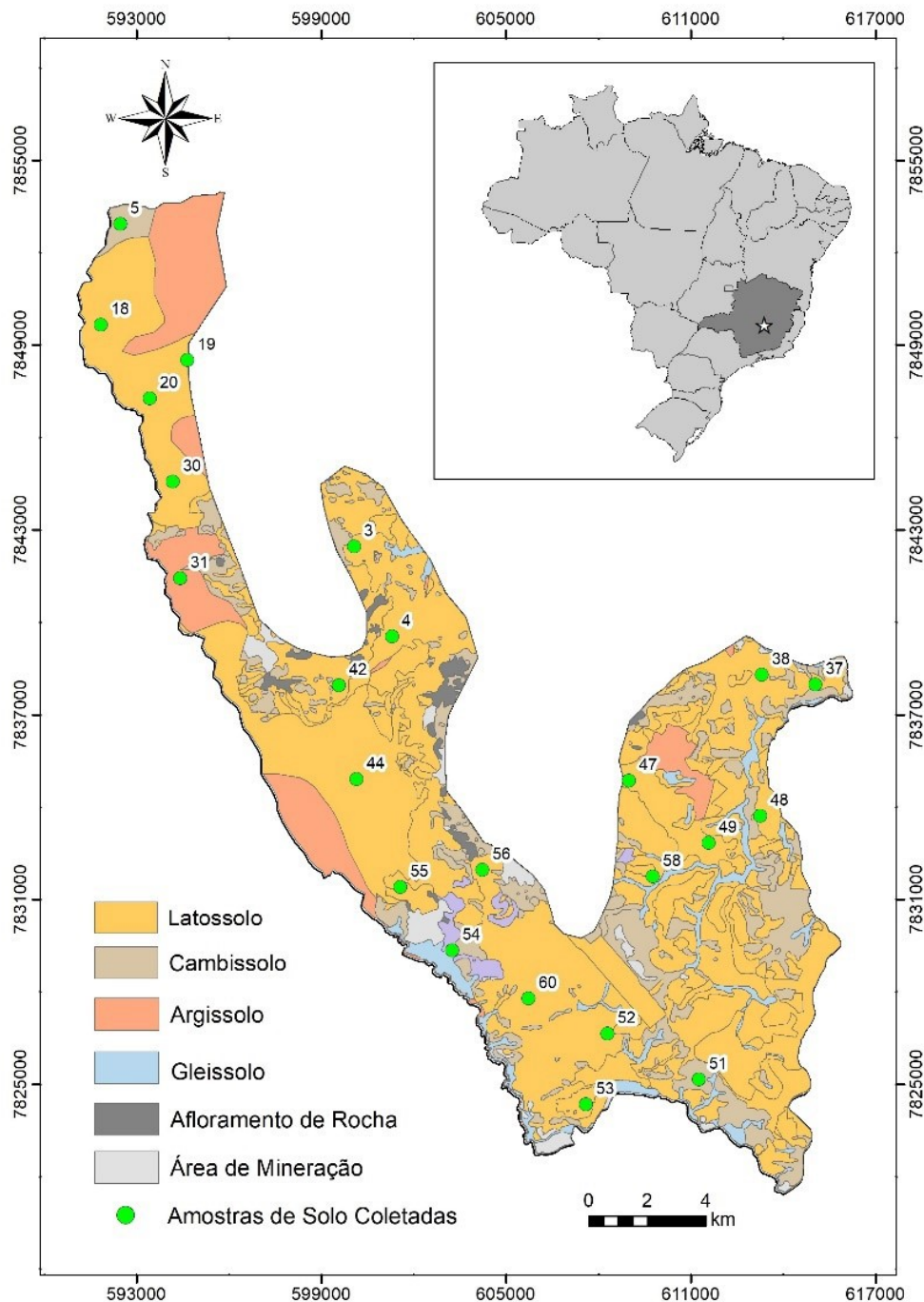


Figura 1 – Mapa de localização dos pontos de amostragem e tipos de solo.
Fonte: Elaborado pelos autores com base em Hermann *et al.* (1998) e UFV (2010).

O pH é um importante parâmetro a ser analisado no solo, haja vista que tem influência direta nos processos de atenuação natural de potenciais contaminantes na zona vadosa, como por exemplo, CTC e adsorção. O pH foi determinado em água e em solução de KCl 1N e CaCl₂.

A determinação do pH em KCl 1N e em água foi realizada por meio da transferência de 10cm³ de terra para um cilindro plástico com tampa (4 x 4 cm). Em seguida, foi adicionado, para determinação do pH em água, 25 ml de água destilada e, separadamente, para o pH em KCl 1N,

25ml da solução de KCl 1N. Agitou-se mecanicamente durante quinze minutos e, após 30 minutos, se procedeu à leitura. O eletrodo de vidro, ou a parte a ele correspondente num eletrodo combinado, ficou no líquido sobrenadante. O pH foi lido sem agitação, depois de atingido o equilíbrio (30 minutos). Antes das mensurações, o medidor de pH foi calibrado com as soluções tampão para pH 4,0 e 7,0. A cada quinze a vinte leituras, o peagâmetro foi calibrado novamente com uma das soluções tampão. Lavou-se o eletrodo entre uma e outra determinação com água destilada por meio de uma pisseta e foi enxugado, evitando raspar o papel absorvente no eletrodo de vidro.

A determinação do pH em solução $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ de CaCl_2 é em média 0,6 unidades menor do que o pH em água, embora as diferenças sejam bastante variáveis. O método consiste em transferir, através de cachimbo, 10 cm^3 de terra para um frasco plástico e em seguida adiciona-se 25 ml da solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, deixando 15 minutos em contato. Agita-se a suspensão por 10 minutos a 220 rpm, usando agitador com movimento circular horizontal ou agitador de pH (decantando depois por 30 minutos). Em seguida, ajusta-se o medidor de pH com as soluções-tampão de pH 4,0 e 7,0 e, frequentemente, com uma dessas soluções, após a determinação de uma série de amostras. Sem agitar, mergulha-se o eletrodo combinado na suspensão, de modo que a ponta do eletrodo de vidro toque ligeiramente a camada de sedimento e a saída do eletrodo de referência fique submersa, lê-se o pH após estabelecido o equilíbrio. Destaca-se que o eletrodo foi lavado com água e enxugado com papel absorvente, após cada determinação. Isso é importante quando se passa para uma suspensão de pH muito diferente, ou de solução-tampão para suspensão de solo. Para valores de pH elevados, o equilíbrio leva algumas dezenas de segundos para ser obtido. Movimentos do eletrodo ajudam a estabelecer o equilíbrio, embora não é recomendado agitar a suspensão.

A análise granulométrica foi determinada através do método da pipeta, com separação nas frações de areia grossa, areia fina, silte e argila. O método consiste em completar o volume da proveta a 500 ml, agitar a suspensão por 30 segundos com um bastão que contém na extremidade inferior um êmbolo de borracha com diâmetro um pouco menor que o do cilindro, com movimento da boca para o fundo e vice-versa. Em seguida, anota-se o tempo (t), e transcorrido o tempo necessário para a sedimentação da argila+silte e argila, conforme a lei de *Stokes*. Posteriormente, introduziu-se uma pipeta de 10 ml a uma profundidade de 10 cm para amostragem de argila+silte e de 5 cm para amostragem de argila, com sucção contínua para evitar turbilhonamento (Tabela 1).

Tabela 1: Tempo necessário, a diferentes temperaturas, para sedimentação de partículas de solo com peso específico de 2,65. Para a argila considerou-se partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm.

Temp. °C	Argila (5 cm)		Argila + Silte (10 cm)	
	Horas	minutos	minutos	Segundos
10	5	13	6	14
11	5	05	6	03
12	4	55	5	54
13	4	48	5	44
14	4	40	5	35
15	4	33	5	27
16	4	25	5	19
17	4	18	5	10
18	4	13	5	03
19	4	05	4	55
20	4	00	4	48
21	3	55	4	41
22	3	50	4	34
23	3	43	4	28
24	3	38	4	22
25	3	33	4	15
26	3	28	4	10
27	3	23	4	04
28	3	20	3	59
29	3	15	3	54

Fonte: IAC¹.

Transferiu-se as alíquotas para cápsulas de porcelana previamente taradas (com aproximação de 0,0001g) e foi seca à 105-110°C por no mínimo oito horas. Foi repetido o procedimento com a prova em branco, contendo a solução dispersante e água destilada. As cápsulas foram retiradas da estufa, esfriadas em dessecador contendo cloreto de cálcio anidro e pesadas rapidamente em balança com precisão de décimo milésimo de grama, para obter o peso da argila + dispersante (A+D) e da argila + silte + dispersante (A+S+D). Os resultados foram expressos em porcentagem da terra fina seca ao ar (TFSA). Das alíquotas pesadas, subtraiu-se o peso do dispersante que, no caso descrito, corresponde a cerca de 0,014g. Cálculos:

Argila (%) na TFSA = [peso da argila + dispersante (A+D) - peso do dispersante (D)] x 500.

Silte (%) na TFSA = [peso da argila + silte + dispersante (A+S+D) - peso da argila (A) - peso do dispersante (D)] x 500.

Areia grossa (%) na TFSA = peso da areia grossa (AG) x 10.

Areia fina (%) na TFSA = 100 - (% argila + % silte + % areia grossa).

Observação: o silte é obtido por diferença quando se utiliza a peneira 0,053 mm.

A coleta e análise do material tiveram como objetivo final a representação de cada unidade de mapeamento, para verificação das condições de atenuação natural do solo a potenciais contaminantes.

¹ Obs.: onde (1) Equação de Stokes: $v = (2/g) \times g \times r^2((Dp - Dsol)/\eta)$ $g = 980,7 \text{ cm/s}^2$; r = raio da partícula; Dp = peso específico da partícula (no caso = $2,65 \text{ g/cm}^3$); $Dsol$ = peso específico da solução e η = viscosidade da água à temperatura considerada.

Os pontos escolhidos para os ensaios de infiltração foram os mesmos pontos onde houve as coletas de amostras de solo para análises físico-químicas. A partir dos resultados, foi realizada a classificação textural das mesmas, onde foi verificada uma “uniformização” dos dados nas classes argilosa a muito argilosa. Mesmo não tendo modificação de classe em nenhuma amostra, no triângulo textural observou-se uma diferenciação entre elas quanto às percentagens de silte, areia e argila e tipo de solo. Sendo assim, esses pontos foram escolhidos em virtude dessa diferenciação, onde se pode observar que a textura, mesmo nessa “uniformização”, mostrou diferentes valores de condutividade hidráulica, conforme será apresentado no item 3.

O método escolhido, foi o de carga constante realizado por meio do Permeômetro de Guelph desenvolvido por Reynolds e Elrick (1985) para determinar, *in situ*, a condutividade hidráulica saturada (kfs).

O equipamento utilizado foi o modelo 2800K1 da *Soilmoisture Equipment Corp.* Ele opera utilizando carga constante empregando o Princípio de Mariotte. O aparelho permite, a partir da saturação do solo, conhecer a condutividade hidráulica, Kfs, mantendo uma carga hidráulica constante. Para a condução dos ensaios, foi realizado um furo de 0,20 m de profundidade com diâmetro de 5,0 cm. O aparelho foi montado e instalado para as medições em estado estacionário, mantendo uma carga constante e medindo, em intervalos de tempo regulares, a altura de água dentro do reservatório. As cargas utilizadas foram de 5,0 cm e de 10,0 cm, sendo um ensaio seguido do outro. A Figura 2 mostra o equipamento montado para início do ensaio. Quando a absorção se equilibrou, mantendo quatro medições constantes, o ensaio foi dado como finalizado.

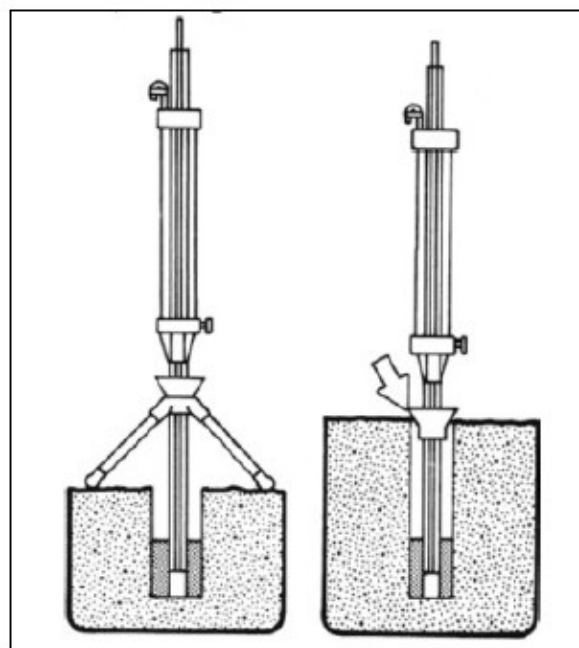


Figura 2 - Figura esquemática do Permeômetro de Guelph após instalado e pronto para a execução do ensaio.

Fonte: *Guelph Permeameter operating instructions SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP.*

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo da área de estudo foi classificado como argiloso (Figura 3), um indicativo muito forte de sorção de potenciais contaminantes no solo e, conseqüentemente, sua mobilidade em subsuperfície. Em geral, este solo apresenta boa capacidade de retenção de potenciais contaminantes.

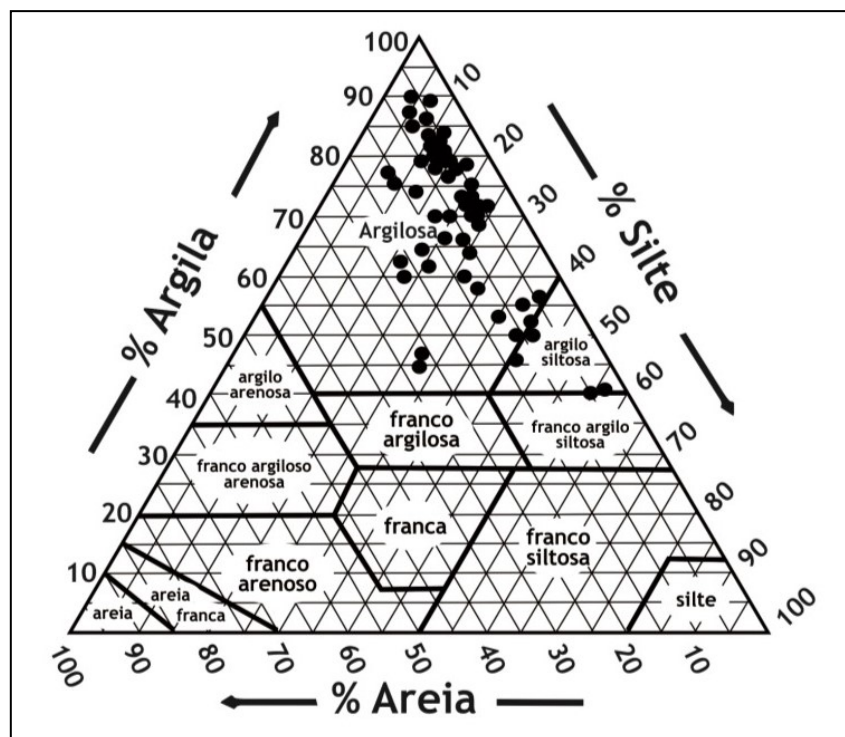


Figura 3 - Resultado textural das amostras de solo.

Fonte: Dados da pesquisa.

A relação silte/argila indica o estágio de intemperismo de solos em regiões tropicais, de modo que valores inferiores a 0,6 nos solos de textura argilosa e muito argilosa são indicativos de intemperismo mais acentuado (SANTOS *et al.*, 2018). A relação silte/argila, mostrada na Tabela 2, indica que na porção mais alta da área de estudo, com altitudes variando entre 780 m a 879 m, o solo sofre um intemperismo mais acentuado.

O solo é bem drenado e em virtude deste intemperismo maior, condiciona a lixiviação dos óxidos de ferro e de alumínio, o que pode ser observado nos valores de óxidos de hematita nas análises de DRX.

Tabela 2:Relação silte/argila nas amostras coletadas na área de estudo.

Ponto	Relação Silte/Argila	Altitude (m)
3	0,11	740
4	0,26	727
5	0,21	806
18	0,13	751
19	0,21	738
20	0,29	751
30	0,08	799
31	0,26	879
37	0,28	724
38	0,26	699
42	0,33	807
44	0,07	833
47	0,21	747
48	0,67	734
49	0,18	721
51	0,75	774
52	0,04	816
53	0,07	780
54	0,57	713
55	0,10	821
56	0,13	826
58	0,38	754
60	0,06	855

Fonte: Dados da pesquisa.

O solo é bem drenado e em virtude deste intemperismo maior, condicionando a lixiviação dos óxidos de ferro e de alumínio, o que pode ser observado nos valores de óxidos de hematita nas análises de DRX. Na Tabela 3 são apresentados os resultados físico-químicos das amostras de solos analisadas pelos laboratórios.

As análises de DRX mostraram uma predominância do argilomineral caulinita, e óxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita) e quartzo, indícios de solos altamente intemperizados, conforme já observado anteriormente, e possivelmente oriundos de sedimentos recentes retrabalhados. Como principal mineral de argila a caulinita, este mineral apresenta menor CTC dentre os minerais de argila. A caulinita possui uma dependência alta do pH quanto à CTC, conforme apontado por MERCKEL e PLANER-FRIEDRICH, (2008). Nesse sentido, a textura argilosa apresentada pela área é importante no quesito infiltração de potenciais contaminantes.

Tabela 3: Análise físico-química das amostras coletadas.

Ponto	pH			foc (%)	M.O. (g/dm ³)	CTC (mmolc/dm ³)	Textura (%)			
	CaCl ₂	KCl	H ₂ O				Argila	Silte	Areia Grossa	Areia Fina
3	5,20	4,30	5,20	1,82	23,00	77,00	84,20	9,00	4,40	2,50
4	5,90	4,90	5,90	1,33	19,00	79,30	72,30	18,70	5,40	3,60
5	4,90	4,00	4,90	1,82	27,00	116,50	79,20	16,40	2,10	2,30
18	4,70	4,00	4,70	1,62	27,00	119,40	83,00	10,70	3,80	2,50
19	5,20	4,10	5,20	1,21	15,00	71,20	75,70	16,10	4,70	3,50
20	5,00	3,90	5,00	1,57	21,00	101,50	71,40	20,80	5,10	2,70
30	5,30	4,20	5,30	3,81	37,00	107,00	88,20	6,80	2,60	2,40
31	6,90	5,80	6,90	1,40	23,00	96,80	76,00	19,40	2,30	2,30
37	5,30	4,10	5,30	1,40	20,00	75,60	67,10	18,80	3,30	10,70
38	4,90	3,90	4,90	1,24	17,00	96,70	72,00	18,90	4,40	4,70
42	5,30	4,20	5,30	1,05	18,00	71,8	66,20	21,80	6,10	5,80
44	5,00	4,20	5,00	2,22	30,00	94,80	86,80	6,50	3,90	2,80
47	4,80	3,90	4,80	2,90	28,00	127,40	75,40	15,60	5,10	3,90
48	5,10	4,00	5,10	< 0,74	12,00	74,40	54,50	36,60	4,90	4,00
49	5,10	4,00	5,10	1,96	28,00	114,90	79,50	14,00	3,90	2,60
51	4,80	3,60	4,80	1,60	25,00	104,80	50,90	38,00	5,30	5,80
52	5,30	4,20	5,30	1,52	23,00	75,20	88,70	3,90	4,80	2,60
53	4,90	4,10	4,90	3,2	34,00	121,80	77,60	5,80	7,80	8,80
54	6,50	5,60	6,50	2,00	29,00	97,00	45,60	26,00	14,20	14,20
55	5,30	4,30	5,30	3,51	38,00	102,90	75,60	7,80	9,90	6,70
56	7,40	6,70	7,40	1,80	27,00	185,30	79,20	10,30	7,20	3,30
58	5,30	3,90	5,30	1,52	23,00	94,50	64,00	24,10	6,90	5,00
60	5,10	4,20	5,10	2,04	29,00	103,80	85,90	5,30	4,90	3,90

Fonte: Dados da pesquisa.

A CTC é diretamente proporcional a matéria orgânica e da quantidade de argila presente no solo. Quando este valor é menor que 2,0% CO, há uma grande variabilidade e essa correlação se torna inexistente (ESSINGTON, 2005).

Os resultados demonstram que apesar das amostras apresentarem homogeneidade textural na classe argilosa, há diferenças entre os tipos de. A análise estatística apresentada na Figura 4 mostra claramente que Latossolos e Cambissolos na área de estudo têm o mesmo comportamento em relação à textura, o que é evidenciado nos ensaios de infiltração.

O resultado mostra uma intrínseca relação entre Latossolos e Cambissolos na área estudada. Segundo Ker (1997), os Cambissolos são solos pouco evoluídos quando comparados aos Latossolos, porém às vezes conforme citado por Santos *et al.*, (2018) alguns solos dessa classe possuem características similares às dos solos da classe Latossolos, o que se pode observar nos solos da área de estudo, conforme mostrado na Figura 4.

A condutividade hidráulica tem componente oposto à relação caulinita/óxidos e tem correlação com a porcentagem de argila e CO. A Tabela 4 mostra a variabilidade da condutividade hidráulica na área de estudo para cada tipo de solo.

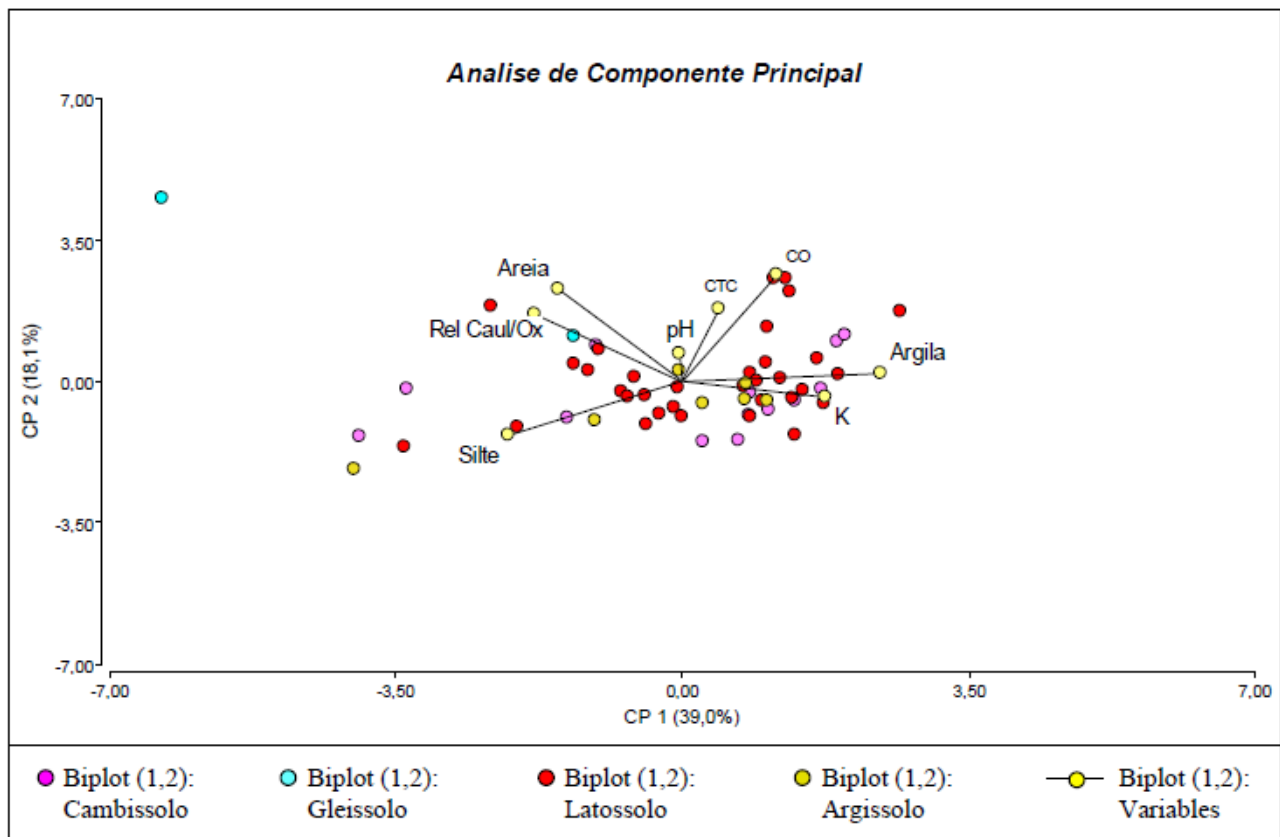


Figura 4 – Análise do comportamento dos diferentes tipos de solos em relação aos parâmetros analisados.
Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4: Variabilidade da condutividade hidráulica em relação ao tipo de solo nos diferentes pontos ensaiados.

	Pontos								
	6	10	19	26	40	48	51	52	54
K(cm/s)	2,26x10 ⁻³	5,08x10 ⁻⁴	1,26x10 ⁻³	2,36x10 ⁻³	2,99x10 ⁻³	5,51x10 ⁻⁴	5,38x10 ⁻⁴	2,81x10 ⁻³	6,34x10 ⁻⁵
Tipo Solo	Argissolo	Cambissolo	Latossolo	Latossolo	Cambissolo	Latossolo	Cambissolo	Latossolo	Gleissolo

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados mostram que Latossolos e Cambissolos apresentam a mesma variabilidade (10^{-3} a 10^{-4} cm. s⁻¹), Argissolos (10^{-3} cm. s⁻¹) e (Gleissolos 10^{-5} cm. s⁻¹).

O Dendrograma, onde os resultados são apresentados na Figura 5, é uma ferramenta estatística que representa graficamente os resultados de forma hierárquica, onde cada variável é representada como um agrupamento separado, mostrando graficamente como esses agrupamentos são combinados até que todos estejam contidos em um único agrupamento (HAIR, 2009).

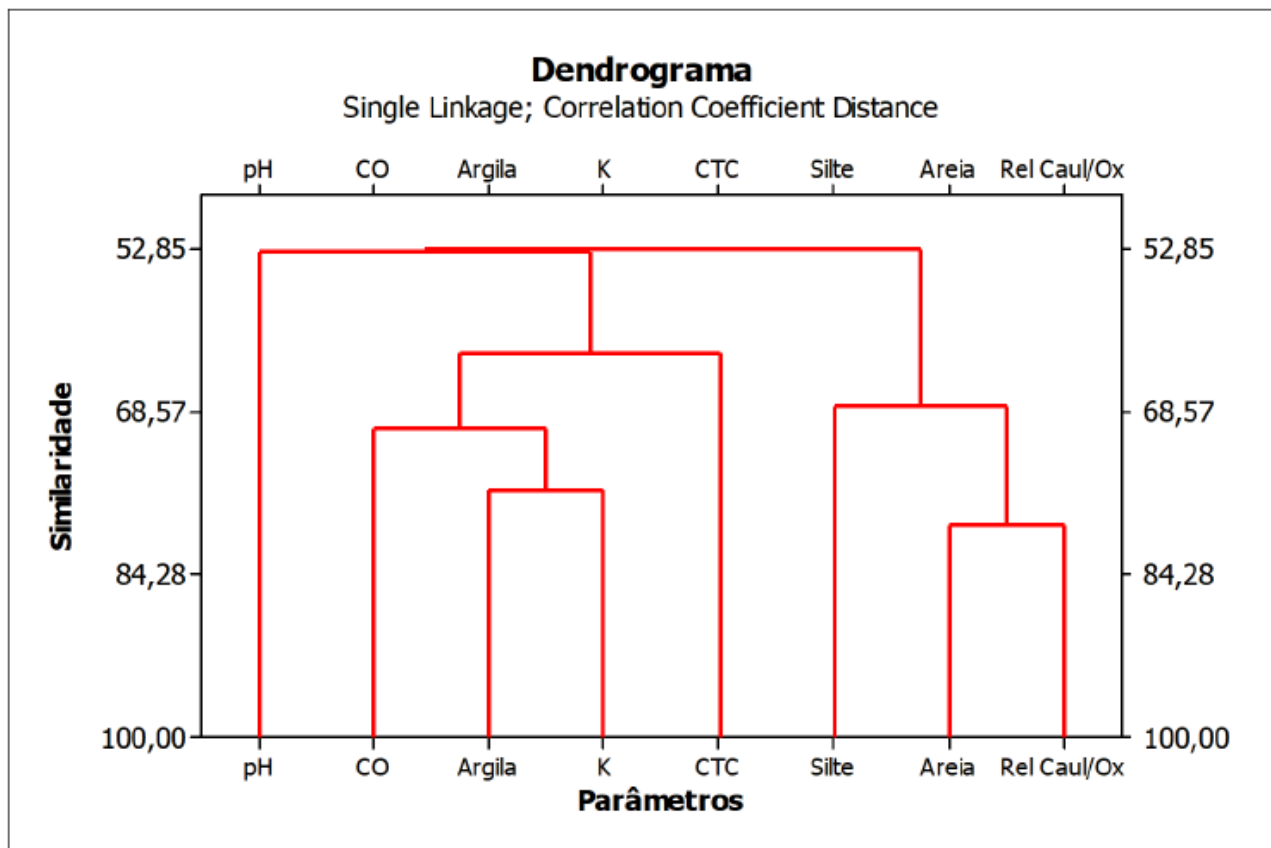


Figura 5 – Análise estatística de similaridade das variáveis utilizadas para análise da infiltração.

Fonte: Dados da pesquisa.

Verificou-se maior similaridade entre areia e relação caulinita-óxidos 79,6%, seguida da porcentagem de argila com a condutividade hidráulica com 76,1% de similaridade e, entre esta e o carbono orgânico, com 70,2%. Como apresentado pela literatura em hidrogeologia (FREEZE; CHERRY, 1979), quanto menor o tamanho do grão, menor a condutividade hidráulica, porém na área de estudo as diferenças de condutividade hidráulica não se explicam somente pela textura (que é argilosa), mas pela relação caulinita-óxidos. Vale a pena ressaltar que a literatura em hidrogeologia leva em consideração a zona saturada e não a zona vadosa. Desta forma, a condutividade hidráulica é influenciada pela quantidade de óxidos, uma vez que estes melhoram a proporção de poros condutores de água. Conforme exposto por Fassbender (1994), a superfície específica é uma das propriedades mais importantes das argilas por ser esta propriedade a responsável pelas reações das argilas com outros compostos. Este autor resalta que apesar da caulinita possuir a menor superfície específica dentre os argilominerais, esta possui grupos de OH presente em sua superfície o que permite uma forte adsorção de oxi-hidróxidos de ferro, unindo de forma eficiente as partículas individuais delas, alcançando granulometricamente do tamanho de areias. Brady e Weil (2013) chamam este processo em solos altamente intemperizados de pseudo-areias. Isso explica por que o agrupamento areia e relação Caulinita/óxidos (RelCau/Ox) tem a maior similaridade na área de estudo, afetando diretamente a condutividade hidráulica e

consequentemente a infiltração de água e potenciais contaminantes. Portanto, o que é evidenciado como areia na análise textural nada mais é que argila que apresenta grãos do tamanho de areia (pseudo-areias).

Para a condutividade hidráulica, as quantidades de areia e silte presente nas amostras analisadas, são as granulometrias que mais afetam a mesma, o que mostra que mesmo na homogeneidade das amostras apresentadas no triângulo textural essas desempenham um papel mais significativo para essas texturas, areia com 69,6%, seguido de silte com 66,6%, o que também está de acordo com a teoria apresentada. Ressalta-se que, na análise estatística, as correlações apresentadas, determinam apenas uma correlação estatística entre as variáveis, onde os resultados devem ser suportados pelo conhecimento teórico que correlaciona tais variáveis. Parece estranho que o pH esteja estatisticamente correlacionado com as variáveis areia, silte e condutividade. Estatisticamente podemos correlacionar qualquer coisa, mas temos que levar em consideração aquilo que faz sentido de acordo com o conhecimento do problema que se está estudando. Dessa forma, a variável pH na análise do Dendrograma, tem realmente influência nos processos de infiltração e consequentemente na atenuação natural, afetando a porosidade. Por meio do processo de adsorção na superfície da caulinita entre óxidos e hidróxidos favorecendo a formação de pseudo-areias, esse processo segundo Fassbender (1994) é maior evidenciado em pH ácido, ou seja, afetando a infiltração natural de potenciais contaminantes em subsuperfície.

A similaridade entre carbono orgânico e argila (70,3%) com a CTC (63,0%) está perfeitamente de acordo com a literatura para correlação desses parâmetros, ou seja, quanto maior porcentagem de argila e carbono orgânico maior as cargas negativas presente no solo e, em consequência maior será a adsorção de potenciais contaminantes catiônicos.

4. CONCLUSÕES

A cobertura argilosa que recobre o carste da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG não promove uma infiltração tão baixa quando comparado a literatura encontrada para a zona saturada. Isso pode ser explicado pelo fato desta ideia levar em consideração que as argilas promovem uma baixa migração e infiltração de potenciais contaminantes porque possuem uma condutividade hidráulica baixa (conceito generalizado aplicado à zona saturada que não pode ser aplicado à zona vadosa), aliado às características da zona vadosa da área estudada onde predomina o argilomineral caulinita e pH ácido o que favorece o processo de infiltração de potenciais contaminantes e água por meio de reação de adsorção de oxi-hidróxidos de ferro na superfície desse argilomineral em texturas argilosas melhorando a estruturação do solo.

REFERÊNCIAS

- BRADY, C. N.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 119p.
- CAMARGO, O. P.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Boletim Técnico. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 7,13,46p.
- ESSINGTON, M. E. **Soil and Water Chemistry: an integrative approach**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2005. 406p.
- FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos de América Latina**. 2.ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperacion Para La Agricultura. Servicio Editorial IICA, 1994. 23p.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karsthydrogeologyandgeomorphology**. West Sussex: John and Wileyand Sons, 2007. 1p.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**.New Jersey: Printice Hall Inc., 1979. 29p.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BARRY, J. B.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 428p.
- HERRMANN, G. **ApaCarste de Lagoa Santa: zoneamento ambiental**. Belo Horizonte: CPRM/SGB, 1998. 9p.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.
- MENESES, I.C.R.R.C. **Análise geossistêmica na área de proteção ambiental (APA) carste de Lagoa Santa, MG**. 2003. 192 f. Dissertação (Mestrado em Tratamento da Informação Espacial) – Instituto de Ciências Humanas, Pontifícia Univerversidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- MERKEL, B. J.; PLANER-FRIEDRICH, B. **Groundwater Geochimistry-A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems**. 2.ed. Berlin: Springer, 2008. 26p.
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D.E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph Permeameter. **Soil science**, v. 140, n. 4, p. 292-302, 1985.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. Brasília: Embrapa, 2018. 57p.
- SELKER, J. S.; KELLER, C. K.; McCORD, J. T. **Vadose zone processes**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 3p.
- SHINZATO, E. **O carste da área de proteção ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos**. 1998. 35 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de

Ciências Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 1998.

SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORP. **Operating instructions**. Model 2800K1. Santa Barbara: Guelph Permeameter, 2008.

SOUZA, R. T.; HEREDIA, O. S.; TRAVASSOS, L. E. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; SAMPAIO, J. L. D. Influência da Espessura da Camada de solo na Proteção dos aquíferos Cársticos sob os Climas Tropical Úmido e Europeu Mediterrâneo, pelo Método de Vulnerabilidade COP. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 1, p. 50-65, 2020.

TANNÚS, M. B.; PEREZ, R. C.; QUEIROZ, J. E. N.; PEDROSA, S. A.; PEDRALLI, G.; QUABIRABA, M. S. G.; RIBEIRO, M. A.; JARDIM, M. E. A. Z.; RIBEIRO, S. T. M.; FREITAS, V. L. O.; CÉSAR, F. M.; MENESES, I. C. R. C.; MELO, M. C.; MARQUES, A. F. S. E. M.; FERNANDES, M. M. **Estudos Ambientais na Região Cárstica de Lagoa Santa - Sete Lagoas**: caracterização pedológica. Belo Horizonte: CETEC/CPRM, 1992. 24p.

TANNÚS, M. B.; MARQUES, A. F. S. M.; FERNANDES, M. M. **Projeto Vida - Caracterização Pedológica**: série cartas temáticas, vol.2. Belo Horizonte: CETEC/CPRM, 1994. 23p.

VIANA, H. S.; TAVARES, V. P.; KOHLER, H. C. **Apa Carste de Lagoa Santa**: meio físico. Belo Horizonte: CPRM, 1998. 18p.

Trabalho enviado em 10/11/2020

Trabalho aceito em 20/12/2021