

## **ANÁLISE DE ELEMENTOS E ÓXIDOS EM PERFIS DE GLEISSOLOS NA PLANÍCIE FLUVIAL DO ALTO MÉDIO RIO MOGI GUAÇU – MG**

Denise Silva Leão de Souza <sup>1</sup>  
Márcio Luiz da Silva <sup>2</sup>  
Alessandro Batezelli<sup>3</sup>

### **INTRODUÇÃO**

Os solos são excelentes indicadores ambientais, cujos atributos químicos e mineralógicos refletem as condições de formação e graus de intemperismo a que foram submetidos.

Considerando a influência da pedogênese e a mobilidade dos elementos no solo, as análises químicas permitem examinar os padrões de distribuição e concentração total dos elementos, inferindo os processos e condições ambientais que influenciaram sua formação (LACERDA, ANDRADE e QUÉMENÉUR, 2002; ROCA, PAZOS e BECH, 2008; CORINGA, COUTO e TORRADO, 2014).

As feições morfológicas e as características ambientais refletem as condições de desenvolvimento e formação dos solos. Em ambientes hidromórficos, os processos pedogenéticos, como paludização, redoximorfismo e bissialitização, são influenciados pelas condições hidrológicas do sistema (DEMATTE et al., 2017).

Os solos hidromórficos, como os Gleissolos, são classificados com base no grau de hidromorfismo, evidenciado pela intensa gleização. Nos Gleissolos, essa característica é resultado de processos de redução e oxidação significativos, provocados pela flutuação do nível do lençol freático sob condições de umidade permanentes ou periódicas (EMBRAPA, 2018).

A análise geoquímica de superfície, incluindo solos e rochas, avalia importantes indicadores da dinâmica ambiental, estabelecendo relações entre as origens natural e antropogênica dos elementos por meio da determinação analítica de elementos maiores, menores e traço (CHADWICK, BRIMHALL e HENDRICKS, 1990).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de elementos na forma de óxidos obtidos por Fluorescência de Raios –X (elementos maiores e menores) e de elementos-traço quantificados por Espectrometria de Massa (ICP-MS) em perfis de Gleissolos na planície fluvial do Alto-Médio Rio Mogi Guaçu, em Minas Gerais.

---

<sup>1</sup> Mestranda em Geociências pela Universidade Estadual de Campinas, [denise.sleaosouza@gmail.com](mailto:denise.sleaosouza@gmail.com)

<sup>2</sup> Doutor em Geologia pela Universidade Estadual de Campinas, [marcgeo10@yahoo.com.br](mailto:marcgeo10@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Professor orientador: Doutor, Universidade Estadual de Campinas, [batezeli@unicamp.br](mailto:batezeli@unicamp.br)

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O estudo foi realizado nos solos da planície fluvial do Rio Mogi Guaçu, no Município de Inconfidentes, localizado na região do Sul de Minas Gerais.

As paisagens dessa região são dominadas por relevos de mares de morros, caracterizados por vertentes côncavas, vales encaixados e planícies fluviais intercaladas, resultantes de intensos processos de dissecação (CARVALHO et al., 2022).

A composição litológica da área inclui formações ígneas e metamórficas de diferentes idades geológicas, variando desde o Arqueano até o Cenozoico (MIRA et al., 2022).

A morfologia do Rio Mogi Guaçu é caracterizada por formas retilíneas a meandantes, com porções anastomosadas e um padrão de drenagem predominantemente dendrítico (CARVALHO et al., 2022).

Foram selecionados três perfis de solos (P1, P2 e P3) representativas das margens do Rio Mogi Guaçu, utilizando os procedimentos de descrição de campo segundo os critérios de preconizados por Santos et al. (2015).

As amostras foram preparadas e submetidas à secagem a 110 °C seguida pela determinação da porcentagem de perda ao fogo a 1000 °C (%PF) na preparação de discos de vidro por fusão com fundente, conforme estabelecido por Vendemiatto e Enzweiler (2001).

Análise química por espectrometria de fluorescência de raios (FRX) foi quantificada na forma de óxidos dos elementos maiores (Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg), e menores (P, Mn, Ti) e de elementos-traço (Ba, Ce, Cr, Cu, Ga, La, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Th, V, Y, Zn, Zr) por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os perfis estudados (P1 e P2) foram classificados como Gleissolos Háplicos Tb Distróficos típico (GXbdt). O terceiro perfil (P3) foi classificado como Gleissolo Háplico Tb Alumínico típico (Gxbat) devido ao alto teor de saturação por alumínio apresentado (EMBRAPA, 2018).

Foram analisados os seguintes óxidos para todos os perfis estudados: SiO<sub>2</sub> (sílica), TiO<sub>2</sub> (dióxido de titânio), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido férrico) e MnO (óxido de manganês) nos três perfis (Tabela 1 e Figuras 1, 2 e 3).

Na figura 1 é apresentado o comportamento dos óxidos em função da profundidade no perfil 1 (P1). A sílica apresentou o maior percentual nos horizontes, seguido da alumina. Os óxidos de titânio e manganês se mantiveram constantes com a profundidade do solo. É possível verificar que a sílica apresenta comportamento oposto ao óxido férrico (Figura 1 e Tabela 1).

No perfil 2 (P2) a sílica também apresentou o maior percentual, seguido da alumina (Figura 2). O dióxido de titânio e o óxido de manganês também permaneceram constantes com a profundidade do perfil. No entanto, no horizonte Cg houve um decréscimo de óxido férrico e alumina e um acréscimo no teor de sílica (Figura 2). No horizonte C ocorreu um acréscimo nos teores de óxido férrico e alumina e um decréscimo no percentual de sílica em função da profundidade.

**Tabela 1.** Elementos e óxidos determinados por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX).

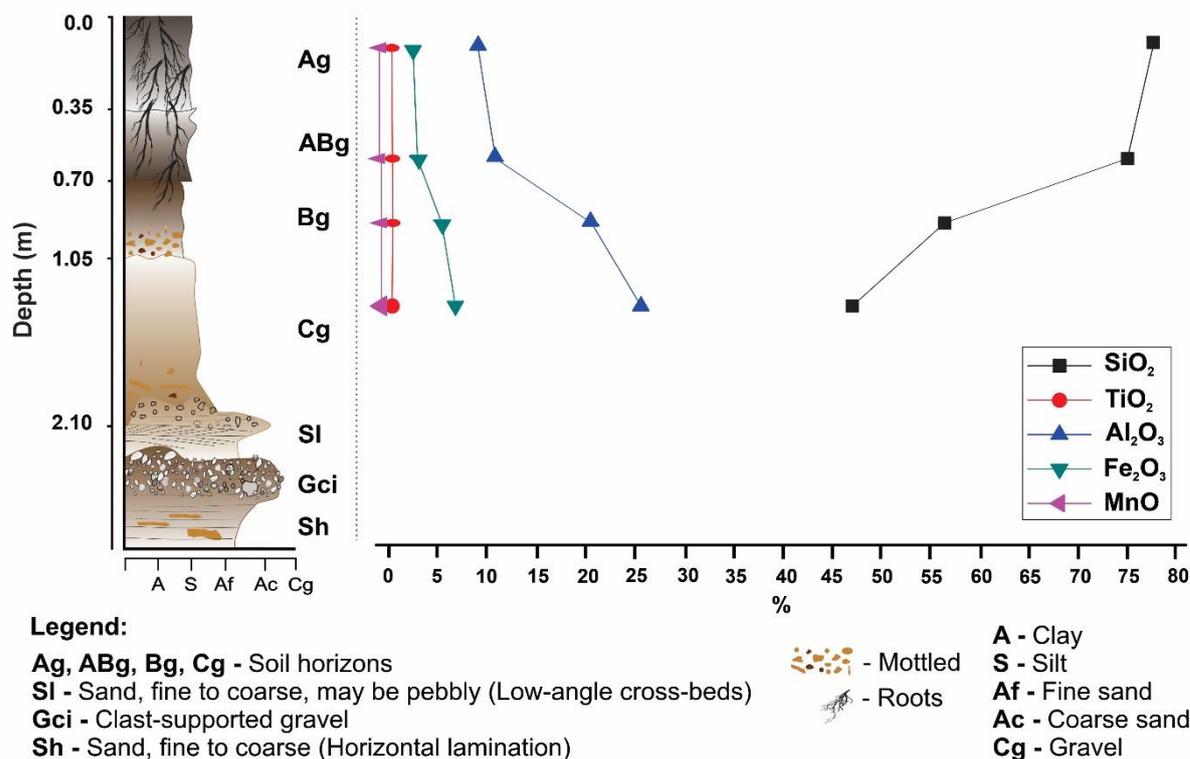
PH	P1-	P1-	P1-	P1-	P2-	P2-	P2-	P2-	P3-	P3-	P3-	P3-	P3-	P3-	D
	Ag	ABg	Bg	Cg	Ag	C	2Bg	Cg	Ag	C	2Ag	2Bg1	2Bg	2Cg	
----- (%) -----															
SiO <sub>2</sub>	76.89	74.38	56.24	47.08	60.21	69.84	64.84	72.11	62.62	79.94	50.32	46.64	60.14	63.28	91.65
TiO <sub>2</sub>	1.336	1.391	1.454	1.359	1.392	1.294	1.389	1.199	1.359	0.592	1.461	1.388	1.462	1.488	0.635
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.88	11.62	21.16	26.09	19.18	14.58	16.96	13.22	18.03	9.59	26.33	26.38	20	17.71	3.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	3.46	3.88	6.3	7.65	5.06	4.16	4.76	4.11	4.48	2.45	5.08	8.1	5.17	4.17	1.17
MnO	0.1	0.103	0.115	0.124	0.097	0.077	0.083	0.071	0.082	0.038	0.059	0.077	0.078	0.087	0.046
MgO	0.52	0.65	0.92	0.95	0.84	0.76	0.88	0.7	0.84	0.52	0.99	1.01	1.08	1.01	0.16
CaO	0.21	0.22	0.25	0.25	0.26	0.24	0.24	0.2	0.16	0.15	0.13	0.11	0.17	0.22	0.08
Na <sub>2</sub> O	0.23	0.24	0.19	0.13	0.22	0.25	0.25	0.24	0.21	0.24	0.15	0.11	0.23	0.23	0.15
K <sub>2</sub> O	2.13	2.38	2.13	1.82	2.13	2.34	2.34	2.24	2.17	2.35	1.88	1.82	2.55	2.6	1.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.105	0.166	0.202	0.172	0.143	0.164	0.117	0.16	0.094	0.238	0.276	0.172	0.152	0.046
P.F. (1000 °C)	5.09	4.95	11	14.2	10.1	6.53	8	5.51	9.83	3.77	13.5	13.9	9.16	8.92	1.26
----- (mg g <sup>-1</sup> ) -----															
Ba	452.2	501	562.3	526.4	572.9	545.9	504.8	552	562.7	420.4	470.4	635	534	677.2	238.3
Ce	151.3	151.8	133.7	99.9	124.1	142.9	98.3	135.3	122.5	87.3	109.2	125.5	51.4	147	77
Cr	28.47	30.17	56.2	68.79	55	42.32	46.94	42.16	51.71	75.3	79.08	63.06	25.9	48.65	9.24
Cu	14	14.3	27.1	33.8	21.6	15.7	19.2	14.7	20.7	31.1	33.7	27.3	9.8	25.4	5.9
Ga	13.01	13.89	27.74	34.26	25.71	19.58	22.52	18.72	26.06	38.57	39.12	31.06	13.23	24.09	4.538
La	74.29	73.3	59.81	41.84	60	68.27	46.19	65.99	60.35	33.3	44.57	58.7	27.4	68.32	42.88
Nb	25.12	24.67	27.78	29.08	29.16	26.3	26.34	25.44	29.37	33.54	31.5	32.52	13.1	28.86	12.57
Nd	57.52	55.23	49.26	37.52	46.92	52.73	39.38	50.34	46.94	35.22	41.27	46.61	22.08	55.45	29.93
Ni	12.5	13.1	25.8	31.3	22.8	17.3	19.9	16.5	22.1	31.4	32.1	27.1	11.4	22.6	4.3
Pb	20.2	22.1	28.8	32.1	29.5	26	24.3	22.2	28.2	33.8	30.3	30.6	18.8	27.1	10.2
Rb	82.3	84.7	100.6	83.3	96.3	91.2	82.8	88.8	93.6	53.9	82.1	116	89	106.6	34.7
Sc	7.22	7.24	11.9	12.74	11.36	9.24	9.55	9.39	11.12	12.12	14.93	13.02	5.75	11.07	9.24
Sr	70.97	72.04	71.53	57.4	69.99	68.65	63.58	67.84	70.61	51.59	61.32	74.98	78.34	87.99	68.65
Th	32.79	34.7	20.64	14.15	20.09	25.77	16.2	25.16	19.75	13.45	14.38	18.85	9.32	26.3	25.77
V	53.61	56.94	96.95	112.4	89	70.65	79.51	69.02	89.07	124.9	135.5	107.5	45.01	86.77	70.65
Y	16.55	15.87	19.35	17.11	19.61	18.04	15.07	18.55	19.07	13.56	19.2	21.47	9.66	19.72	18.04
Zn	134.4	68.7	97.2	105.2	91.5	81.3	140	78.1	261.8	132.3	129.5	128.5	59.5	112.5	81.3
Zr	439	421.1	311.5	205.9	453.8	380.4	452.3	435.3	364.7	282.4	222.2	399.7	145.2	527.8	380.4

PH: Perfil e horizontes.

No perfil 3 (P3), a sílica também foi o óxido com o maior percentual, seguida dos óxidos de alumina e do óxido férrico (Figura 3). O teor de óxido de manganês permaneceu constante com a profundidade do perfil.

A alumina e sílica também apresentam comportamentos inversamente proporcional no perfil (Figura 3). No horizonte C houve um decréscimo nos percentuais de dióxido de titânio e óxido férrico e um acréscimo no teor de  $\text{SiO}_2$ . A partir do horizonte 2Ag houve um decréscimo no teor  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e um acréscimo no percentual de o teor de  $\text{SiO}_2$  em função da profundidade.

A mobilidade da sílica (Si) no solo é altamente estável ao longo do perfil, sendo lentamente lixiviada, seguida do alumínio (Al) e do ferro (Fe). O  $\text{Al}^{3+}$  imobiliza-se em variações de pH de 4,5 a 9,5, enquanto o  $\text{Fe}^{3+}$  imobiliza-se em condições oxidantes (LOUGHNAN, 1969).

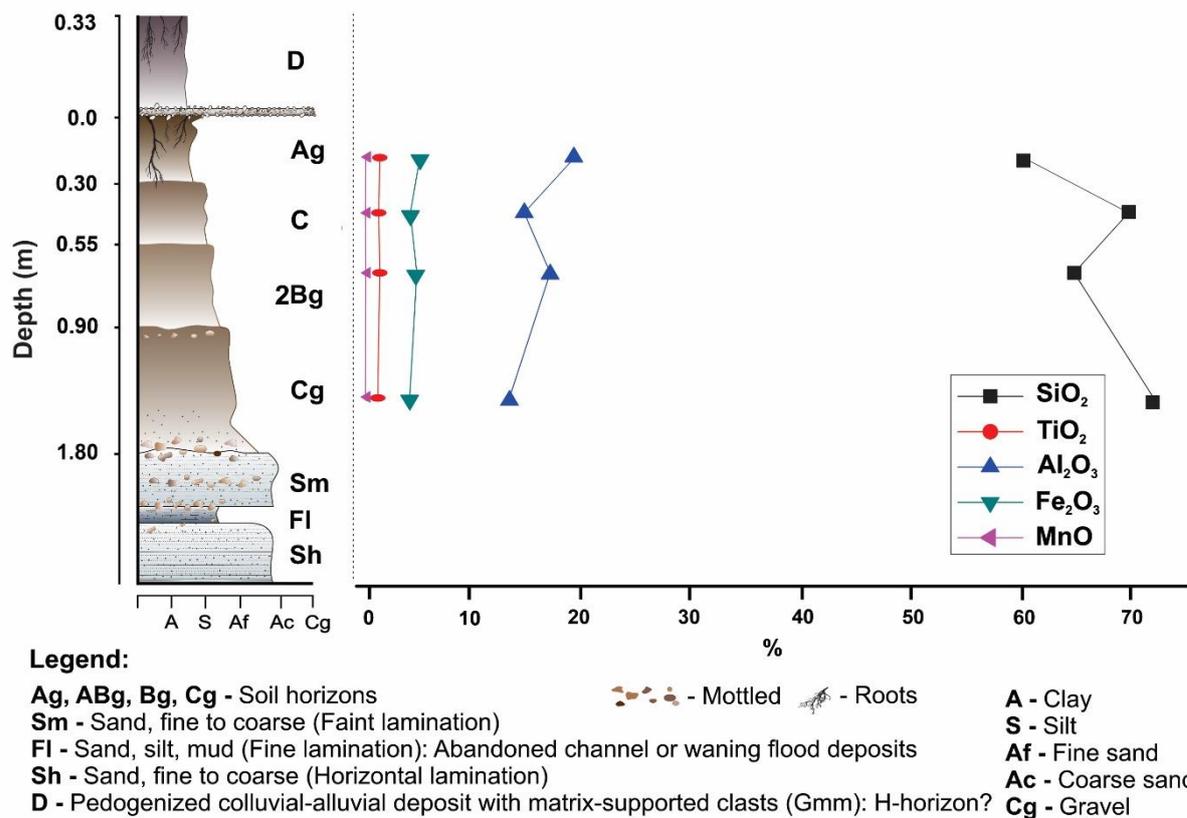


**Figura 1.** Comportamento no teor de óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e  $\text{MnO}$  dos solos em relação à profundidade - Perfil 1 (P1).

Em solos de regiões tropicais úmidas, a lixiviação de sílica leva ao acúmulo de óxidos de Fe e Al (MELLO e PEREZ, 2009).

A concentração de óxidos de Fe em solos e sedimentos está relacionada à ação combinada de fatores externos (clima, material de origem, drenagem, tempo de intemperização e atividade biológica) e processos internos de formação do solo (como gleização, podzolização,

ferritização e alitização) (COSTA e BIGHAM, 2009). Coringa, Couto e Torrado (2014) também encontraram altos teores de alumina e ferro nos perfis de Gleissolos do norte do Pantanal Mato-grossense. A presença de Fe nos solos está associada à existência de formas cristalinas de óxidos de Fe e nódulos de Fe e Mn nos horizontes de subsuperfície, bem como à perda de Fe em períodos de redução (solos hidromórficos), onde o Fe na forma reduzida torna-se bastante solúvel e passível de ser lixiviado (CORINGA, COUTO E TORRADO, 2014).



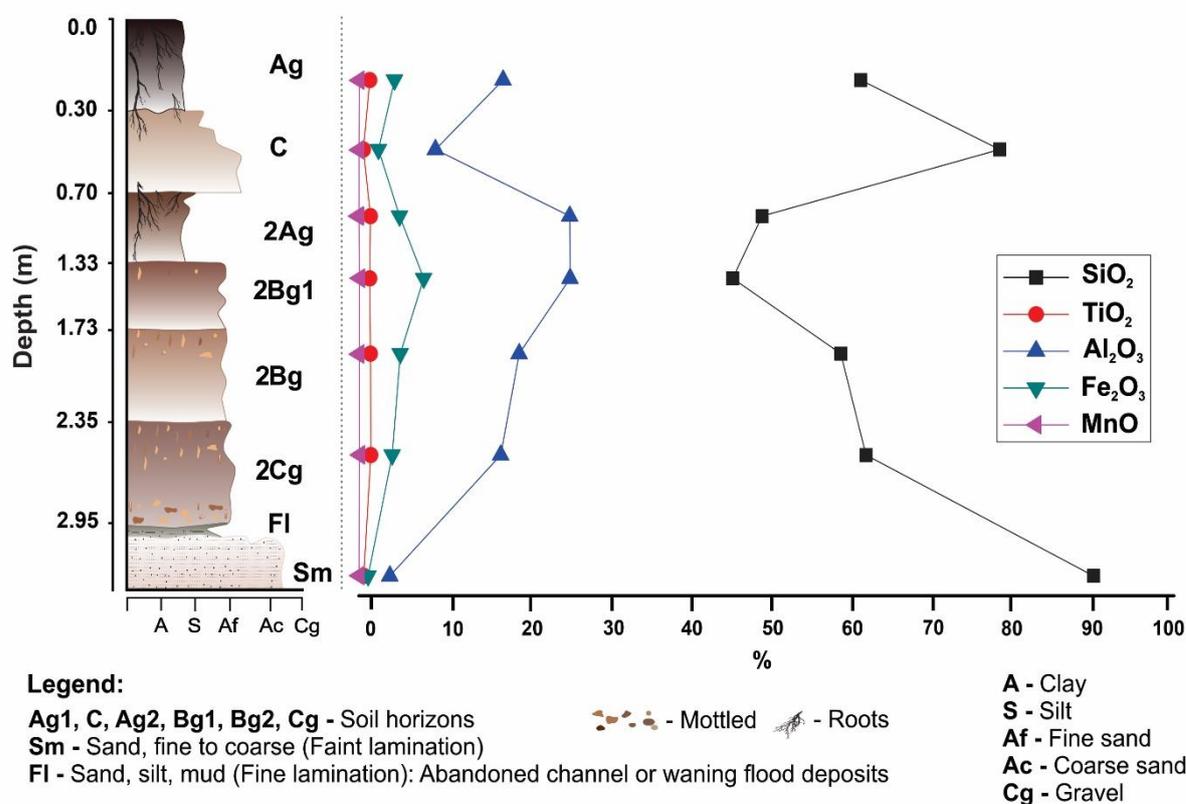
**Figura 2.** - Comportamento no teor de óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e  $\text{MnO}$  dos solos em relação à profundidade - Perfil 2 (P2).

O Al é um dos elementos mais abundantes no solo e durante o intemperismo, ele é liberado de minerais primários e precipita, formando minerais secundários, principalmente como aluminossilicatos e óxidos de alumínio (MELLO e PEREZ, 2009). A dessilicção de óxidos de alumínio, é recorrente das associações de argilominerais silicatados presentes nos perfis de alteração, resultando na remoção total ou parcial de  $\text{SiO}_2$  do solo (LACERDA, ANDRADE e QUÉMÉNEUR, 2002).

O manganês (Mn) é um dos primeiros elementos liberados durante o intemperismo de minerais primários, o que explica sua frequente acumulação nos saprólitos ou no horizonte C do solo (KÄMPF et al., 2009, p. 593). Sua presença e teor são mais prováveis em ambientes de

solo onde há alternância de processos de oxidação e redução, os quais afetam a mobilidade e a precipitação do Mn (KÄMPF et al., 2009, p. 594).

Os teores de Ti no solo são considerados elementos altamente resistentes ao intemperismo, fazendo parte da estrutura dos óxidos minerais de Fe e Al (CORINGA, COUTO e TORRADO, 2014). No solo se comportam como minerais residuais herdados do material de origem ou formados pelo intemperismo de minerais portadores de titânio, sendo comumente utilizados para determinar se os horizontes têm origem autóctone ou alóctone (KÄMPF et al., 2009).



**Figura 3.** Comportamento no teor de óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e  $\text{MnO}$  dos solos em relação à profundidade - Perfil 3 (P3).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A variação das concentrações de óxidos de sílica, dióxido de titânio, alumina, óxido férrico e manganês em relação à profundidade dos perfis (P1, P2 e P3) sugere distintos graus de evolução pedológica e possíveis gêneses de solos compostos e/ou poligenéticos em perfis de Gleissolos.

O comportamento oposto dos óxidos de sílica (Si) e ferro (Fe) ao longo da profundidade dos perfis possibilitam influências pedogenéticas, com a perda de Fe nos horizontes superficiais

associada a processos redoximórficos influenciados principalmente pela oscilação do lençol freático do canal.

Considerando a influência na pedogênese (material de origem e grau de hidromorfismo) das diversas classes de Gleissolos, revela-se uma complexa interação entre processos morfogênicos, morfodinâmicos, pedogênicos, hidro-sedimentológicos e climáticos que a planície do Alto-Médio Rio Mogi Guaçu vem experimentando ao longo do período Quaternário.

**Palavras-chave:** Pedogeoquímica, ambiente fluvial, relação solo-paisagem, processos pedogenéticos.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores ao agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UNICAMP e ao CNPq, pela bolsa de Mestrado (131438/2021–2) e Bolsa de Produtividade CNPq (310734/2020–7). Agradecem também ao Grupo de Estudos Solos, Paleossolos, Depósitos e Evolução de Paisagens do IFSULDEMINAS do *campus* Inconfidentes – MG.

### **REFERÊNCIAS**

CARVALHO, D. S.; SOUZA, D. S. L.; MIRA, I. R. C.; SILVA, M. L. Análise morfométrica da Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, Sul de Minas Gerais. **Rev. Ibero-Am. Ciênc.**, v 13, p. 338-352, 2022.

CHADWICK, O. A.; BRIMHALL, G. H.; HENDRICKS, D. M. From a black to a gray box - a mass balance interpretation of pedogenesis. **Geomorphology**, v 3, p. 369-390, 1990.

CORINGA, E. A. O.; COUTO, E. G.; TORRADO, P. V. Geoquímica de solos do pantanal norte, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v 38, p. 1784-1793, 2014.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. **Óxidos de ferro**. In: Melo, V.F., Alleoni, L.R.F (Eds.), Química e mineralogia do solo. Parte I – Conceitos básicos. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 505-572, 2009.

DEMATTE, J. A. M et al. Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring. (**JEM**), v 197, p. 50-62, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. (Orgs), Brasília, EMBRAPA, 2018.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. **Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio**. In: Melo, V. F., Alleoni, L.R.F. (Eds.), Química e mineralogia do solo, Parte I – Conceitos básicos. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 573-610, 2009.

LACERDA, M. P. C.; ANDRADE, H.; QUEMÉNÉUR, J. J. G. Pedogeoquímica em perfis de alteração na região de Lavras (MG). I- elementos maiores - óxidos constituintes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v 26, p. 75-85, 2002.

LOUGHNAN, F. C. **Chemical weathering of the silicate minerals**. Elsevier, New York, p. 154, 1969.

MELLO, J. W. V.; PEREZ, D.V. **Equilíbrio químico das reações no solo**. In: Melo, V.F., Alleoni, L. R.F. (Eds.), Química e mineralogia do solo, Parte I – Conceitos básicos. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 151-249, 2009.

MIRA, I. R. C.; CARVALHO, D. S.; SOUZA, D. S. L., & SILVA, M. L. Vulnerabilidade Ambiental da Sub-Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v 15, 1352–1370, 2022.

ROCA, N.; PAZOS, M. S.; BECH, J. The relationship between WRB soil units and heavy metals content in soils of Catamarca (Argentina). **Journal of Geochemical Exploration**, v 96, p. 77-85, 2008.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 102, 2015.

VENDEMIATTO, M. A.; ENZWEILER, J. Routine control of accuracy in silicate rock analysis by X-ray fluorescence spectrometry. Geostandards Newsletter, **The Journal of Geostandards and Geoanalysis**, v. 25, p. 103-112, 2001.