

Distribuição espacial de ferro e manganês trocáveis em solos do pantanal

Spatial distribution of iron and manganese exchangeable wetland soils

Léo Adriano Chig¹(*)
Eduardo Guimarães Couto²
Raphael Moreira Beirigo³
Lúcia Andréa de Oliveira Lobato⁴
João Paulo Novaes Filho⁵

Resumo

O ferro (Fe) e o manganês (Mn) trocáveis estão entre os elementos mais móveis na solução do solo em ambientes redutores. No Pantanal, há vários ambientes em que os solos apresentam condições redutoras sazonais ou permanentes relacionadas aos pulsos de inundação. Dentre as principais alterações que os pulsos de inundação causam nos solos, estão as mudanças nas condições de oxirredução. O Fe e o Mn estão entre os elementos mais suscetíveis a tais alterações, que influenciam diretamente a disponibilidade desses elementos para os ciclos biogeoquímicos. O objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial dos teores de Fe e de Mn trocáveis em três áreas com superfícies geomórficas representativas da paisagem da sub-região do pantanal de Poconé (MT). Em cada área, foi delimitada uma parcela de 6.000 m², subdividida em unidades amostrais de 10 x 10 m, onde foram realizadas coletas sistemáticas de 77 amostras de solos, nas profundidades de 0 a 20 cm e de 40 a 60 cm. Nas áreas ocorrem solos das classes: Luvisolo Háptico em um paleodique (área 1) e Gleissolo Háptico em duas paleoplanícies (áreas 2 e 3). Os resultados indicam grande variabilidade espacial dos teores de Fe e de Mn trocáveis e dos teores de argila. A dependência espacial dos teores de Fe e de Mn trocáveis foi considerada de alta a moderada, nas duas profundidades, evidenciando os efeitos

-
- 1 Dr.; Engenheiro Agrônomo; Professor Titular da Universidade de Cuiabá, UNIC; Endereço: Jardim Europa CEP: 78065-900, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil; E-mail: leochig@gmail.com (*) Autor para correspondência.
 - 2 Dr.; Professor Associado de Ciência do Solo, DSER/FAMEV/UFMT; Endereço: Avenida Fernando Corrêa, s/n, CEP: 78060-900, Boa Esperança, Cuiabá, Mato Grosso; E-mail: couto@ufmt.br
 - 3 Dr.; Engenheiro Agrônomo; Professor Adjunto I de Solos e Meio Ambiente, CCTA/UACTA/UFMG; Endereço: Rua Jario Vieira Feitosa, no 1770, CEP: 58840-000, Pereiros, Pombal, Paraíba, Brasil; E-mail: rmbeirigo@yahoo.com.br
 - 4 Engenheira Agrônoma; Universidade Federal de Mato Grosso; Endereço: Avenida Fernando Corrêa, s/n, CEP: 78060-900, Boa Esperança, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil; E-mail: luclobato@ibest.com.br
 - 5 Dr.; Universidade Federal de Cuiabá, Av. Fernando Corrêa, s/n, CEP: 78060-900, Boa Esperança, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil; E-mail: jpnovaes@terra.com.br

Recebido para publicação em 17/10/2014 e aceito em 08/10/2015

intrínsecos causados pela posição que os solos ocupam na paisagem e a interação de fatores como a drenagem e o processo de oxirredução.

Palavras-chave: semivariograma; variabilidade espacial; química do solo.

Abstract

Iron (Fe) and manganese (Mn) exchangeable are among the most mobile elements in soil solution in reducing environments. In *Pantanal*, there are several environments in which the soils have seasonal or permanent reducing conditions related to flood pulses. Among the major changes that flood pulses cause to soils are the redox conditions. Mn and Fe are among the most susceptible elements to such transformations that directly influence the availability of these elements to the biogeochemical cycles. Our objective was to study the spatial variability of the Fe and Mn exchangeable levels in three areas with geomorphic landscape surfaces representing the subregion wetland area known as *Pantanal Poconé* (MT). In each of the three areas it was delimited a plot of 6,000 m², divided into sampling units of 10 m x 10 m, where systematic collection of 77 soil samples at depths 0–20 cm and 40–60 cm were performed. The classification of the soil classes in the three areas were: Haplic Luvisol in a paleodike (area 1) and Humic Haplicin two paleoplains (areas 2 and 3). The results indicate large spatial variability in the levels of Fe and Mn exchangeable and in the clay contents. The spatial dependence of the levels of Fe and Mn exchangeable was considered high to moderate at both depths, indicating the intrinsic effects caused by the position that soils occur in the landscape and in the interaction of factors such as drainage and redox process.

Keywords: semivariogram; spatial variability; soil chemistry.

Introdução

O Pantanal é uma planície sazonalmente inundável, onde as flutuações anuais do nível de água regulam os processos ecológicos ali existentes (JUNK et al., 1989; NEIFF, 1990). Os solos do Pantanal sofrem a influência direta da inundação condicionada pela posição na paisagem (relevo). O tipo e duração da inundação promovem saturação permanente ou temporária dos solos, resultando em mudanças físicas, químicas, biológicas e físico-químicas. Dentre os principais processos pedogenéticos que ocorrem nos solos do Pantanal, estão os

processos redoximórficos (gleização e plintização), caracterizados pela presença marcante de feições redoximórficas, como revestimentos, mosqueados e nódulos de ferro (Fe) e manganês (Mn).

A ocorrência de solos redoximórficos ou hidromórficos é generalizada em todo o Pantanal Mato-grossense (AMARAL FILHO, 1986; SANTOS et al., 1997; COUTO; OLIVEIRA, 2011). Os processos ligados à transformação e à translocação do Fe ocorrem em várias ordens de solos, como Planossolos, Plintossolos, Cambissolos Flúvicos, Gleissolos, Luvissolos, Vertissolos, Chernossolos, Espodossolos,

Neossolos Flúvicos e Quartzarênicos (ORIOLI et al., 1982; FAO, 1988; SANTOS et al., 1997; ZEILHOFER; SCHESSL, 1999; OLIVEIRA et al., 2006; COUTO; OLIVEIRA, 2011; BEIRIGO et al., 2011), que se distribuem associados a diferentes superfícies geomórficas, onde os principais processos pedogenéticos são os de ambientes redoximórficos. As inundações sazonais causam flutuações do nível do lençol freático, principalmente nas posições mais baixas da paisagem. Enquanto que, nas posições mais altas, os paleodiques, a precipitação pode causar a formação de lençol suspenso. A formação de lençol suspenso e epissaturação do solo levam ao surgimento de características estágnicas (FAO, 2001; VAN BREEMEN; BUURMAN, 2002; BRADY; WEIL, 2004; BUOL et al., 2011; VEPRASKAS; LINDBO, 2012), tornando o ambiente redutor mesmo nas posições mais altas da paisagem. Em condições anaeróbicas, os maiores receptores de elétrons passam a ser os compostos NO_3^- , MnO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, SO_4^{2-} e CO_2 . Teoricamente, esses compostos são reduzidos na sequência apresentada acima, em virtude da depleção do receptor de elétrons anterior e da diminuição do potencial de oxirredução (Eh) dos solos (VEPRASKAS, 2001; VEPRASKAS; FAULKNER, 2001).

A cor é o principal indicativo do estado de oxidação do Fe e do Mn e sua consequente disponibilidade para os diversos ciclos biogeoquímicos. O estado de oxidação do Fe e Mn influencia fortemente sua solubilidade e cor, conferindo-lhes os mosqueados marrons, cinzas, azuis, pretos e amarelos, frequentemente observados em solos hidromórficos (FANNING; FANNING, 1989; VAN BREEMEN; BUURMAN, 2002).

O estado de oxidação do Fe e do Mn tem forte influência em diversos processos

biogeoquímicos que ocorrem nesses solos como coprecipitação, adsorção e dessorção de elementos traços, como La, Sr, Zn, Cd, Co, Cu, Mo, V, Pb, Hg (COELHO; VIDAL-TORRADO, 2000; HYLANDER, 2000; LIU et al., 2002; SINGH et al., 2005) e de P (SHENKER, 2005), pois influencia a mobilidade e disponibilidade desses elementos. Os principais óxidos de Fe da fração argila nos solos do Pantanal são goethita, hematita e lepidocrocita (COUTO et al., 2002, DALMOLIN et al., 2010; SOUSA; SOUZA, 2013), porém as maiores concentrações desses óxidos estão localizadas nas feições redoximórficas.

Devido à importância do Fe e do Mn trocáveis em solos de ambientes com variações sazonais das condições de oxirredução, a técnica geoestatística, utilizando informações especializadas, pode ajudar a compreender melhor os processos biogeoquímicos que ocorrem nesses solos. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo analisar a distribuição espacial dos teores do Fe e Mn trocáveis e do teor de argila em três solos de superfícies geomórficas representativas da paisagem da sub-região do Pantanal de Poconé (MT), durante o período da seca.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em três áreas (um paleodique e duas paleoplanícies) inseridas no Pantanal Mato-grossense, localizadas na subregião de Poconé (MT). O critério utilizado para a seleção das áreas foi o da superfície geomórfica. As fitofisionomias das áreas são de cerrado mesotrófico, com alta ocorrência da espécie carvoeiro (*Callisthenefasciculata* Mart.) (Figura 1). O clima da região é classificado como Aw (quente e úmido), segundo classificação de Köppen (1948). A amplitude térmica é

relativamente alta, com temperaturas mínimas entre 20 e 28 °C e as máximas ultrapassam a 40 °C (HECKEMAN et al., 1993). Em cada uma das áreas em estudo, foi delimitada uma parcela de 0,6 ha (6.000 m²) e seus limites foram georreferenciados. Foram coletadas 77 amostras de solo em malha fixa de 10 x 10 metros, nas profundidades de 0 a 20 cm e de 40 a 60 cm, utilizando-se trado holandês. Foi, ainda, descrito um perfil representativo do solo para cada cordilheira, para o qual a descrição e coleta de solo no campo seguiram as recomendações propostas por Santos et al. (2005).

O Fe e Mn trocáveis foram extraídos com solução Mehlich-1 (HCl 0,05 M + H₂SO₄ 0,0125 M) e os teores determinados por espectrofotometria de absorção atômica (EMBRAPA, 1997). A granulometria foi determinada pelo método do densímetro de Bouyoucos (KIEHL, 1979), após dispersão com solução de NaOH 1 M.

Além disso, foram determinados os atributos morfológicos, químicos e físicos das amostras coletadas dos perfis para a classificação dos solos, segundo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

A análise estatística foi realizada em três etapas. Na primeira etapa, os atributos físico-químicos do solo (teores de Fe e Mn trocáveis e teor de argila) foram avaliados por meio da análise estatística descritiva, calculando-se a média, a mediana, o desvio padrão, o coeficiente de variação e os valores máximos e mínimos. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio do programa computacional SPSS. Foi aplicado, também, o teste de médias (Tukey e $F_{p < 0,01}$) para identificar as diferenças entre os atributos físico-químicos do solo nas três áreas e em ambas as profundidades.

Na segunda etapa, utilizou-se o algoritmo básico de indução de árvores de decisão como forma recursiva, de cima para baixo (HAN; KAMBER, 2001). A indução de árvore de decisão se inicia com um conjunto de treinamento, que é dividido de acordo com um teste sobre uma das variáveis independentes, sendo formados subconjuntos mais homogêneos em relação à variável dependente. Esse procedimento é repetido até que sejam obtidos conjuntos de exemplos bem homogêneos, para os quais seja possível atribuir um único valor para a variável dependente. O critério utilizado para escolher a variável independente que divide o conjunto de exemplos em cada repetição é o aspecto principal do processo de indução.

Na análise dos dados para a indução de árvore de decisão, para a variável produção, foi adotado o desvio padrão como critério para classificação, sendo definidos, como nível médio de produção, os dados no intervalo entre a média, mais ou menos, um desvio padrão. Os dados inferiores a esse intervalo foram definidos como nível baixo e, os superiores, definidos como nível alto.

A indução de árvore de decisão foi realizada por meio da ferramenta Tree (Tree node) do SPSS, sendo utilizado o algoritmo de redução de entropia (QUINLAN, 1993). A árvore de decisão foi escolhida para ser binária, com dois ramos a partir de cada nó interno. Para evitar que o modelo ficasse muito específico para o conjunto de treinamento, o que comprometeria a sua generalização e o desempenho com novos exemplos, foram adotadas duas regras de parada do algoritmo de indução. A primeira regra limitou a profundidade da árvore, permitindo que esta tivesse no máximo seis níveis. A segunda regra limitou a fragmentação do conjunto de treinamento,

requerendo um mínimo de 10 exemplos em cada nó para a busca de uma nova divisão e, pelo menos, cinco exemplos em cada nó folha.

Na terceira etapa, foi avaliada a dependência espacial dos atributos físico-químicos, por meio de ajuste de semivariogramas pelo programa GS+ (ROBERTSON, 1998). A análise do grau de dependência espacial dos atributos foi realizada segundo Cambardella et al. (1994), em que são considerados com forte dependência espacial os semivariogramas que têm um efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar; moderada, entre 25% e 75%; e, fraca, quando for maior que 75%.

Posteriormente, para interpolação dos dados, utilizou-se a técnica de krigagem proposta por Isaaks Srivastava (1989), para que fossem gerados os mapas de isovalores dos atributos estudados.

Resultados e Discussão

Os perfis dos solos foram classificados conforme critérios da Embrapa (2013), como: Paleodique área 1 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico (TXo); Paleoplanícies áreas 2 e 3 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd).

As superfícies geomórficas das três áreas são pedoambientes caracterizados por altas concentrações de Fe e de Mn trocáveis (valores superiores a 45 e de 5 mg.dm⁻³, respectivamente) nas duas profundidades do solo (Tabela 1), características químicas que, segundo Lopes e Guilherme (1992), Alvarez et al. (1999), Raj et al. (1996), são consideradas altas. Porém, os teores de Fe e de Mn são menores na camada subsuperficial, condição esta condizente com os processos redoximórficos atuantes nesses solos e pelos menores teores de matéria orgânica em

maiores profundidades. A decomposição da matéria orgânica, liberação de exudatos radiculares e atividade microbiana geram ácidos orgânicos (LUNDSTRÖM, 2000), que contribuem para formação de quelatos, aumentando a disponibilidade desses elementos nos horizontes superficiais (RAVEN et al., 1996; JONES, 1998).

Observou-se, nas superfícies geomórficas estudadas, uma diferença de nível de apenas 34 cm, do paleodique da área 1, em relação à cota das paleoplanícies das áreas 2 e 3. Foram verificados, nas cotas mais baixas, indicativos de alagamento. Os solos estudados têm textura variando de franco-argilo-arenosa até muito argilosa. De modo geral, principalmente nas áreas 2 e 3, a fração argila predomina sobre a fração silte, embora esta seja bastante expressiva. Essa é uma tendência dos solos da sub-região do Pantanal de Poconé (COUTO et al., 2002) e são resultados da deposição de sedimentos em um ambiente lântico. Já o solo da área 1 apresenta menor teor de argila, por ocorrer em um antigo dique fluvial, cuja sedimentação desses ambientes ocorreram com maior energia, elevando a deposição de areia (TÖRNQVIST e BRIDGE, 2002; NASCIMENTO et al., 2013).

A distinção de drenagem entre as três áreas foi acompanhada pelas mudanças nas propriedades morfológicas e químicas, verificadas nos perfis de solo (Tabelas 1 e 2).

A influência do ambiente é mais efetiva no solo da área 3 (Figura 2), considerando que o teor de Fe trocável foi superior às outras áreas, o que sugere ter sofrido maior remobilização local constante em função das variações sazonais do potencial de oxirredução. O estado de oxidação do Fe e do Mn influencia fortemente sua solubilidade e cor, conferindo-lhes os mosqueados marrons, cinzentos, azuis, pretos

Tabela 1 -Teores médios de Fe e de Mn trocáveis e de argila nos solos nas profundidades de 0 a 20 e 40 a 60 cm

Área	Prof. (cm)	Fe mg.dm ⁻³	CV %	Mn mg.dm ⁻³	CV %	Argila g.kg ⁻¹	CV %			
1	0 a 20	153,10	Aa	30	48,88	Aa	55	330	Cb	27
2	0 a 20	178,31	Aa	56	21,18	Ca	31	825	Aa	7
3	0 a 20	169,92	Aa	16	30,07	Ba	60	726	Bb	8
1	40 a 60	62,17	Ab	24	15,25	Bb	51	506	Ba	23
2	40 a 60	108,22	Bb	42	5,97	Cb	83	799	Ab	14
3	40 a 60	156,05	Cb	19	19,30	Ab	60	763	Aa	8

Fonte: Chig, L.A. et al. (2014).

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem entre si, entre as áreas na mesma profundidade pelo teste de Tukey ($p < 0,01$). Médias seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem entre si entre as profundidades de mesma área pelo teste de F ($p < 0,01$).

Tabela 2 - Características morfológicas dos perfis de solos

(continua)

Horiz.	Prof. (cm)	Cor Munsell*		Cerosidade	Estrutura	Consistência	Textura
		Matriz	Mosqueado				
Perfil 1 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico A moderado, textura argilosa fase Cerrado mesotrófico sobre paleodique relevo plano.							
A	0-18	bruno-amarelado (10 YR 5/4)				dura a muito dura, firme, plástica e pegajosa.	franco argiloso/ argila
Bt1	18-45	bruno-avermelhado (5,0 YR 5/3,5)	comum, médio e distinto no topo do Bt1 bruno-amarelado (10 YR 5/4)	moderada e comum	média a grande, prismática, composta de moderada, pequena, blocos subangulares e angulares;	muito dura, muito firme, plástica e pegajosa	argila/ muito argilosa
2Bt	45-74	bruno avermelhado (5,0 YR5/3,5)		moderada e comum	moderada, média a grande, prismática, composta de forte, pequena, blocos subangulares e angulares	muito dura, muito firme, plástica e pegajosa.	argila/ muito argilosa

Tabela 2 - Características morfológicas dos perfis de solos

(continuação)

2BC	74-110	bruno-avermelhado (5,0 YR 5/3,5)	comum, médio e distinto bruno-claro (7,5 YR 6/4)	moderada e comum	moderada, média a grande, prismática, composta de forte, pequena, blocos subangulares e angulares.	Muito dura a extremamente dura, muito firme, plástica e pegajosa	Argila
2C	100-116+	bruno-avermelhado (5,0 YR 4/4)	comum, pequeno e proeminente ocorrendo em canais bruno-acinzentado (2,5 Y 5/2)	moderada e comum	média a grande, prismática, composta de forte, pequena, blocos subangulares e angulares	Muito dura, muito firme, plástica e pegajosa	francoargilo-siltosa
Perfil 2 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico argissólico A moderado textura argilosa fase Cerrado mesotrófico sobre paleoplanície relevo plano.							
A	0-7	bruno-acinzentado muito escuro (10 YR 3/2)			forte, pequena a média, blocos angulares e subangulares	Dura a muito dura, firme, plástica, pegajosa.	argila
Btg1	7-29	bruno-acinzentado escuro (10 YR 4/2)	abundante, pequeno e distinto, bruno-amarelado (10 YR 5/8)		moderada a forte, média a grande, prismática, composta de moderada, grande, blocos angulares.	Dura, muito firme, muito plástica e muito pegajosa	muito argiloso
Btg2	29-77	bruno-acinzentado escuro (10 YR 4/2)	abundante, pequeno e distinto, bruno-amarelado (10 YR 4/6)		forte, média a grande, prismática, composta de forte, média a grande, blocos angulares.	muito dura, muito firme, plástica e pegajosa	muito argilosa
BCg	77-94+	bruno-acinzentado (10 YR5/2)			forte, média a grande, prismática, composta de forte, grande, blocos angulares.	muito dura a extremamente dura, firme, plástico e pegajosa	muito argilosa

Tabela 2 - Características morfológicas dos perfis de solos

(conclusão)

Perfil 3 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico argissólico moderado textura argilosa fase Cerrado mesotróficopaleoplanície relevo plano.

A	0-10	bruno-escuro (10 YR 3/3)		fraca, moderada, média, blocos subangulares	dura firme, plástico, pegajoso.	argila
Btg1	10-33	bruno-acinzentado (10 YR 5/2)	abundante, pequeno, proeminente vermelho (2,5 YR 4/8)	moderada, média, prismática com blocos angulares e subangulares	dura, plástico pegajoso.	argila
Btg2	33-78+	bruno acinzentado (10 YR 4/2)	abundante, pequeno e distinto vermelho (2,5 YR 4/8)	moderada, prismática, composta de forte, média, blocos angulares e subangulares	dura, plástica e pegajosa	argila

Fonte: Chig, L.A. et al. (2014).

e amarelos, frequentemente observados em solos hidromórficos (FANNING;FANNING, 1989; VAN BREEMEN;BUURMAN,2002).

A variação sazonal da chuva e da evapotranspiração levam a uma flutuação do lençol freático, propiciando, dessa forma, alternância nas condições de redução e oxidação dos óxidos de ferro. A mobilização do ferro (Fe^{2+}) e do manganês (Mn^{3+} e Mn^{2+}) durante o período de inundação da planície pantaneira, leva à sua segregação e à formação de algumas zonas enriquecidas e outras empobrecidas desses elementos, produzindo uma coloração característica nos solos, conforme descrito por Vepraskase Faulkner (2001) e observados por Hamilton et al. (1997) e Couto et al. (2002).

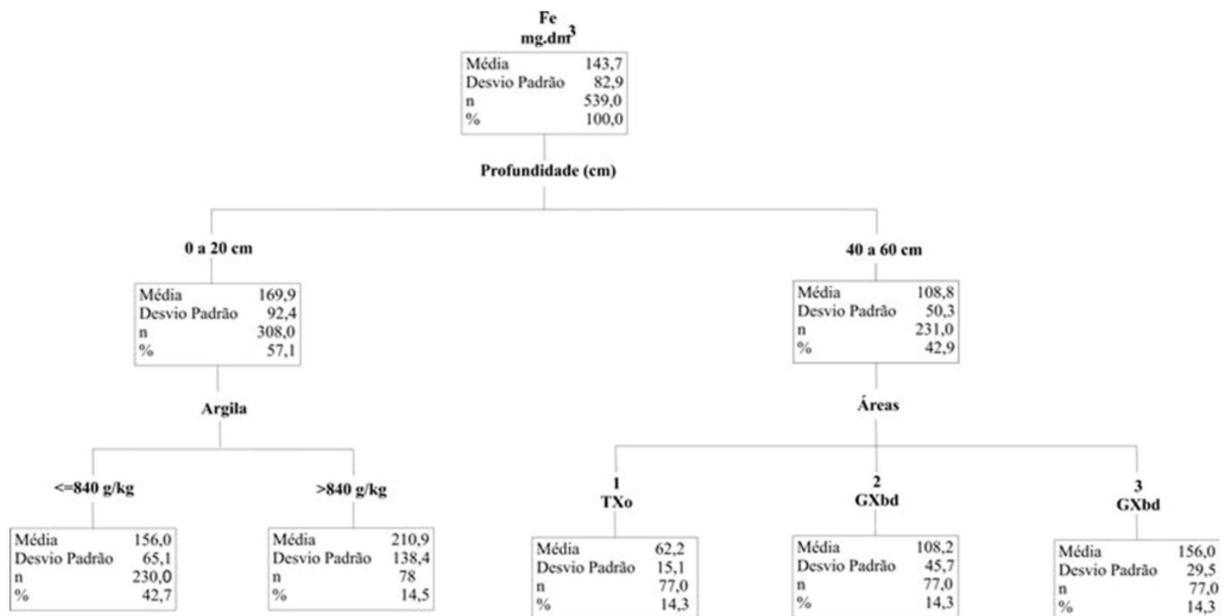
Os resultados dos semivariogramas (Tabela 3) demonstraram que houve dependência espacial nas três áreas e em ambas as profundidades para os atributos estudados. Todos os atributos estudados

apresentaram moderada a forte dependência espacial nas duas profundidades (0 a 20 cm) e (20 a 60 cm), de acordo com o critério proposto por Cambardella et al. (1994), pois as proporções do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar ($C + C_0$) variaram de 0% a 49%.

Para os atributos estudados, nas três áreas e em ambas as profundidades, foi observado alcance mínimo de 22,5 m para os teores de argila (área 3) e máximo de 91,9 m para os teores de manganês (área 1). O alcance reflete o grau de homogeneidade entre as amostras, ou seja, quanto maior for o alcance, maior será a homogeneidade entre as amostras. Essa relação de dependência espacial implica interação entre os dados, os quais não podem ser considerados independentes dentro do domínio de 22,5 m.

Foi constatado que os alcances do teor de Fe e Mn do solo da área 2 e os teores de argila dos solos das áreas 1 e 3

Figura 2 - Indicadores das diferenças dos teores de Fe trocável nos solos das três áreas de estudo



Fonte: Chig, L.A. et al. (2014).

Nota: Área 1 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico (TXo); Área 2 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd); Área 3 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd).

Tabela 3 - Características dos semivariogramas para os teores de Fe, Mn e Argila (0 a 20 cm e 40 a 60 cm)

(continua)

Atributos	Áreas	Prof.	Modelo	Co	Co+C1	$\frac{a}{(m)}$	R ²	SQR	D	Classe
Fe	1	1	Esférico	282,0	2.099,0	32,1	0,70	246,09	13	F
	2	1	Esférico	10,0	20.670,0	30,4	0,66	4,25	00	F
	3	1	Esférico	81,5	168,0	48,3	0,97	66,10	49	M
Fe	1	2	Exponencial	62,4	147,9	75,6	0,73	772,00	48	M
	2	2	Exponencial	69,0	1.555,0	25,2	0,74	32.479,00	4	F
	3	2	Esférico	288,0	907,0	54,9	0,71	54.819,00	32	M
Mn	1	1	Esférico	27,0	575,7	27,5	0,71	17.883,00	5	F
	2	1	Esférico	50,3	116,5	73,5	0,87	347,00	43	M
	3	1	Esférico	154,0	372,0	58,7	0,95	1.024,00	41	M
Mn	1	2	Esférico	6,4	55,5	91,9	0,99	11,30	12	F
	2	2	Exponencial	1,6	10,9	40,8	0,27	23,40	14	F
	3	2	Esférico	65,8	144,0	81,7	0,54	2.971,00	46	M

Tabela 3 - Características dos semivariogramas para os teores de Fe, Mn e Argila (0 a 20 cm e 40 a 60 cm)

		(conclusão)								
Argila	1	1	Esférico	779,0	2.959,0	73,7	0,97	68.991,00	27	M
	2	1	Exponencial	222,0	2.168,0	30,9	0,67	150.564,00	10	F
	3	1	Exponencial	140,0	3.418,0	30,6	0,75	207.751,00	04	F
Argila	1	2	Esférico	1.213,0	3.380,0	48,8	0,93	112.492,00	36	M
	2	2	Esférico	2.440,0	6.801,0	72,6	0,94	481.615,00	36	M
	3	2	Exponencial	10,0	3.821,0	22,5	0,77	142.585,00	1	F

Fonte: Chig, L.A. et al. (2014).

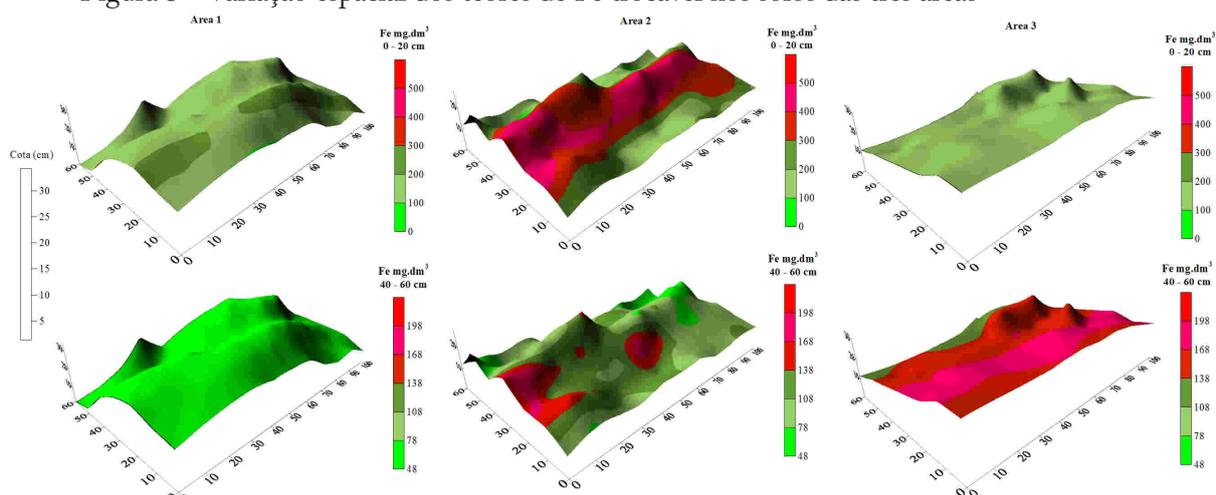
Nota: Prof. = Profundidade (1 = 0 a 20 cm; 2 = 40 a 60 cm); Co = Efeito Pepita, Co+CI = Patamar, A = Alcance em metros; D = Dependência espacial (em %); F= Forte dependência espacial (% efeito pepita < 25), M = Moderada dependência (25 < %efeito pepita < 75), Fr= Fraca dependência espacial (% efeito pepita > 75), R = Aleatória (efeito pepita puro) (CAMBARDELLA et al., 1994).

diminuíram com a profundidade, condição que não corrobora os trabalhos realizados por Trangmar et al. (1985), Webster (1985), Couto (1997) Couto e Klamt (1999) e Lobato (2000), em que verificaram que o alcance tende a aumentar com a profundidade. Isso demonstrou a peculiaridade existente em solos hidromórficos do Pantanal, formados pela complexa interação dos processos e fatores de formação.

Os resultados dos semivariogramas (Tabela 3) demonstraram que houve dependência espacial nas duas profundidades para os atributos dos solos estudados, o que possibilitou o uso da krigagem e a consequente caracterização da distribuição espacial desses atributos em ambas as profundidades (Figura 3, 4 e 5).

A distribuição espacial dos teores de Fe trocável é mais distinta nos solos com

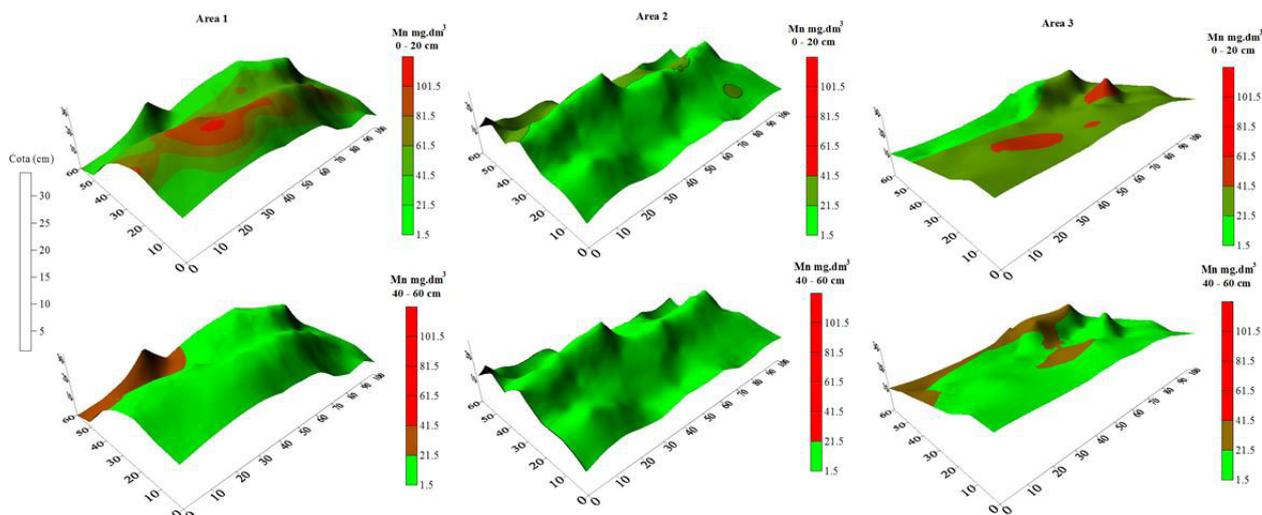
Figura 3 - Variação espacial dos teores de Fe trocável nos solos das três áreas



Fonte: Chig, L.A. et al. (2014).

Nota: Área 1 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico (TXo); Área 2 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd); Área 3 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd)

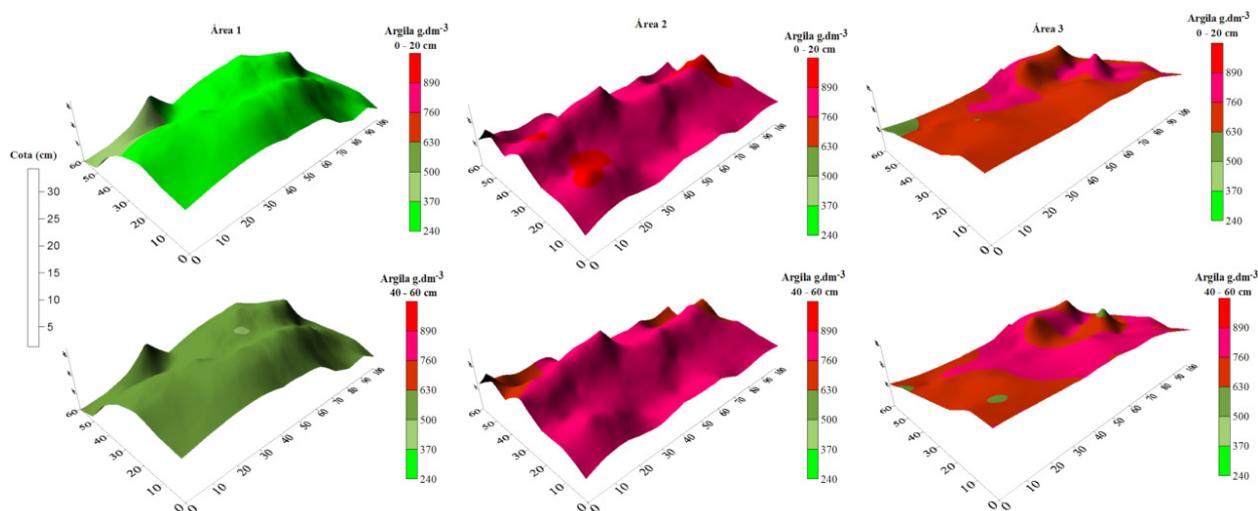
Figura 4 - Variação espacial dos teores de Mn trocável nos solos das três áreas



Fonte: Chig, L.A. et al. (2014).

Nota: Área 1 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico (TXo); Área 2 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd); Área 3 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd).

Figura 5 - Variação espacial dos teores de argila nos solos das três áreas



Fonte: Chig, L.A. et al. (2014).

Nota: Área 1 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico (TXo); Área 2 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd); Área 3 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (GXbd).

maiores teores de argila, os quais ocorrem nas cotas mais baixas, o que acusa maior influência dos processos redoximórficos, ou seja, nos solos das áreas 2 e 3. Na camada superficial do solo, os teores de Fe trocável

são mais concentrados no GleissoloHáplico da área 2, principalmente nas partes mais altas do ambiente.

A variabilidade espacial do teor de Fe trocável Mn trocáveis na camada subsuperficial (40 a

60 cm) foi maior no solo da área 3, enquanto que os teores de Fe da camada superficial (0 a 20 cm) não apresentaram diferença estatística entre os solos das três áreas estudadas. Porém, os teores de Mn foram maiores na área 1.

Conclusão

Os teores de Ferro e de Manganês trocáveis foram maiores nas camadas superficiais dos solos estudados, do que nas subsuperficiais; essa observação está condizente com os processos redoximórficos atuantes nesses solos, pois, nos horizontes de superfície, os teores de matéria orgânica são maiores o que aumenta o aporte desses elementos; além disso, há a colaboração da flutuação do nível do lençol freático em que fica evidenciado, principalmente, o fenômeno da translocação, depois que os elementos Ferro e Manganês foram solubilizados pela sua redução.

Os principais fatores que influenciaram na distribuição espacial dos teores de Ferro e de Manganês trocáveis nos solos foram o teor de argila e a sua posição

na paisagem; esta, mesmo com pouca diferença de cotas, tem relação direta com a drenagem dos solos e o consequente estado de oxidação desses elementos.

A distribuição espacial do Ferro e do Manganês tiveram dependência espacial classificada como moderada a forte, nas duas profundidades, evidenciando que esses elementos apresentaram certa distribuição contínua, pelo menos dentro do espaço de amostragem; assim, ficou demonstrado pela análise geoestatística que esses atributos de solo apresentaram alguma estrutura na sua variabilidade, que não pode ser considerada aleatória.

Agradecimentos

Apoio financeiro: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Áreas Úmidas (INAU) - Programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia - CNPq/MCT. Fundação Nacional de Desenvolvimento do Ensino Superior Particular - FUNADESP.

Referências

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. **Interpretação dos resultados das análises de solos.** In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais.** 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359p.

AMARAL FILHO, Z. P. **Solos do Pantanal Mato-grossense.** In: SIMPÓSIO SOBRE RECURSOS NATURAIS E SÓCIO-ECONÔMICOS DO PANTANAL, 1., 1986, Corumbá. **Anais...** Corumbá: [S.I.], 1986. p91-103

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** (Tradução Técnica: Igo Fernando Lepsch). 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716p.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN, H.; OLSHEN, R. A.; STONE, C. **Classification trees.** Londres: Chapman e Hall, Chapman and Hall, 1984. 358p.

BUOL, S.W.; SOUTHARD, R.J.; GRAHAM, R.C.; McDANIEL, P.A. **Soil genesis and classification**. 6th ed. Chichester: Willey-Blackwell, 2011. 543p.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORNA, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, p.1501-1511,1994.

COELHO, M.R.; VIDAL-TORRADO, P. Cério (Ce) em ferricretes nodulares desenvolvidos em solos da Formação Adamantina. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n.2, p.329-336,2000.

COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no Sul do Estado de Mato Grosso. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, DF, v.34, n.12, p.2321-2329,1999.

COUTO, E.G.; JACOMINE, P.K.T.; NUNES da CUNHA, C.; VECCHIATO, A.B. **Guia da excursão técnica da XIV RBMCSA**. Cuiabá: UFMT. 2002. 68p.

COUTO, E.G. **Variabilidade espacial de propriedades do solo influenciado agricultura em escala regional e local no sul do estado do Mato Grosso**. 1997. 183 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

COUTO, E.G.; OLIVEIRA, V.Á.de. The soil diversity of the pantanal. In: JUNK, W.J.; SILVA, C.J. da; NUNES da CUNHA, C.; WANTZEN, K.M. (Org.). **The pantanal: ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland**. Sofia: Pensoft, 2011. p71-102.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900p.

DALMOLIN, R.S.D.; DICK, D.P.; KLAMT, E.; COUTO, E.G.; SAMUEL-ROSA, A. Mineralogical assemblage and iron oxides of soils of the Pantanal biome, Brazil. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., 2010, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane, [S.I.], 2010. v. 1. p.52-55.1-DVD.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.

FANNING, D.S.; FANNING, M.C.B. **Soil morphology, genesis and classification**. New York: John Wiley, 1989. 395p.

FAO. **Soil map of the World: revised legend**. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 1988. 138p. Reprint of World Soil Resources Report 60, FAO, Rome, (ISRIC Technical Paper, 20).

FAO - FOOD and AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO/Unesco. Lecture notes on the major soils of the world. **World Soil Resources Reports**, v.94, Rome. Fanning, D.S. e Fanning M.C.B. Soil – Morphology, genesis, and classification. University of Maryland. 2001. 394p.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica aplicada**. Uberlândia: UFU, 2001. 49p. (Núcleo de Estudos Estatísticos e Biométricos).

HAMILTON, S.K.; SIPPEL, S.J.; CALHEIROS, D.F.; MELACK, J. M. An anoxic event and other biogeochemical effects of the Pantanal Wetland on the Paraguay River. **Limnology and Oceanography**, v. 42, n.2, p.257-272, 1997.

HECKMAN, C.W.; HARDOIN, E. L.; FERREIRA, S.A.; KRETZCHMAR, A. Preliminary observations on some cosmopolitan algae in ephemeral waterbodies of Pantanal, Mato Grosso, Brasil. In: GOBPAL, B.; HILLBRICHT-ILKOWSKA, A.; WETZEL, R. G. (Ed.). **Wetlands and Ecotones: Studies on Land-water Interactions**, New Delhi: 1993. p.279-292.

HYLANDER, L. D.; MEILI, M.; OLIVEIRA, L. .; SILVA, E. C. S.; GUIMARÃES, J. R. D.; ARAÚJO, D. M.; NEVES, R. P.; STACHIW, R.; BARROS, A. J. P.; SILVA, G. D. Relationship of mercury with aluminum, iron and manganese oxy-hydroxides in sediments from the Alto Pantanal, Brazil. **The Science of the Total Environment**, v.260, p.97-107, 2000.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: MacGraw-Hill, 1941. 281 p.

JONES, D.L. Organic acids in the rhizosphere—A critical review. **Plant Soil**, v. 205, p 25-45, 1998.

JOURNAL, A.C.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic, 1978. 600p.

JUNK, W.J.; BAILEY, P.B.; SPARKS, R.E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Can. J. Fish. Aquat. Sci.**, v.106, p.110-127, 1989.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

KÖPPEN, W. **Climatología**. Buenos Aires: Fondo de Cultura, 1948.

LIU, F.; COLOMBO, C.; ADAMO, P.; HE, J.Z.; VIOLANTE, A. Trace elements in Manganese-Iron nodules from a Chinese Alfisol. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 66, p.661-670, 2002.

LOBATO, L.A.O. **Distribuição espacial de atributos pedológicos em áreas de cerrados mesotróficos no Pantanal de Poconé - MT**. 2000. 142 f. Dissertação (Mestrado em (S.I.)) - Universidade Federal de Mato Grosso, FAMEV, Cuiabá, 2000.

- LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. **Solos sob “Cerrado”**- Manejo da fertilidade para a produção agropecuária. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1992. 60p.
- LUNDSTRÖM, U.S.; VAN BREEMER, N.; BAIN, D. The podzolization process. A review. **Geoderma**, v. 94, p.91-107, 2000.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v.58, n. 8, p.1246-1266, 1963.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fountoinebleau, 1971. v.05.
- MCBRATNEY, A. B.; Pringle, M. J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, v.1, p.125-152, 1999.
- NASCIMENTO, A.F.; FURQUIM, S.A.C.; COUTO, E.G.; BEIRIGO, R.M.; OLIVEIRA JUNIOR, J.C.; CAMARGO, P.B.; VIDAL-TORRADO, P. Genesis of textural contrasts in subsurface soil horizons in the northern Pantanal-Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1113-1127, 2013.
- NEIFF, J.J. Ideas for anecological interpretation of the Paraná. **Interciência**, v.15, n.6, p.424-441, 1990.
- OLIVEIRA, H.; CARVALHO FILHO, A.; SCHAEFER, C.E.G.R.; CARDOSO, E.L. Soils of the Pantanal. In: LAL, R. (Org.). **Encyclopedia of Soil Science**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 2006. p.1658-1663.
- ORIOLI, A.L.; AMARAL FILHO, Z.P.; OLIVEIRA, A.B. Pedologia: levantamento exploratório de solos da Folha SE 21 (Corumbá) e Parte da Folha SE 20. In: BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro: 1982. cap. 1, p.25-328.
- SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; COLET, M.J.; RODRIGUES, L.H.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; MANDONI, R.J.A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, v.40, p.840-847, 2010.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. (Boletim 100). Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. (Boletim técnico).
- BEIRIGO, R. M.; TORRADO, P. V.; STAPE, J. L.; COUTO, E. G.; ANDRADE, G. R. P. **Solos da Reserva Particular do Patrimônio Natural SESC Pantanal**. Rio de Janeiro: SESC, Departamento Nacional, 2011. 76p.
- RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; CURTS, H. **Biologia vegetal**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1996. 728p.

SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C. de; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Rev.Viçosa: UFV, 2005.

SANTOS, R.D. dos; CARVALHO FILHO, A.; NAIME, U.J.; OLIVEIRA, H.; MOTTA, P.E.F.; BARUQUI, A.M.; BARRETO, W.O.; MELO, M.E.C.C.M.; PAULA, J.L.; SANTOS, E.M.R.; DUARTE, M.N. Pedologia. In: **Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai**– PCBAP: diagnóstico dos meios físico e biótico – meio físico. Brasília. DF: PNMA. 1997. v.2. t1, p.127-307.

SHENKER, M.; SEITELBACH, S.; BRAND, S.; HAIM, A.; LITAOR, M.I. Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland. **European Journal of Soil Science**, v. 56, p.515–525, 2005.

SINGH, K.P.; MOHAN, D.; SINGH, K.V.; MALI, A. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-a tributary of the Ganges, India. **Journal of Hydrology**.v.312, p.14–27, 2005.

SOUSA, J.B.; SOUZA, C.A. Caracterização morfológica e mineralógica de solos em ambientes de cordilheira e campo de inundação no pantanal de Poconé, Mato Grosso. **Boletim de Geografia**, v.3, p.53–66, 2013.

TÖRNQVIST, T.E.; BRIDGE, J.S. Spatial variation of overbank aggradation rate and its influence on avulsion frequency. **Sedimentology**, v.49, p. 891–905, 2002.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p. 45-94, 1985.

VAN BREEMEN, N.; BUURMAN, P. **Soil Formation**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Acad. Pub. 2002. 404p.

VEPRASKAS, M.J.; FAULKNER, S.P. **Redox chemistry of hydric soils**: wetland soils. 2001.

VEPRASKAS, M.J. Morphological features of seasonally reduced soils. In: RICHARDSON, J.L.; VEPRASKAS, M.J. (Ed.). **Wetland soils**: genesis, hydrology, landscapes, and classification. Boca Raton: Lewis Publ., 2001. p.163-182.

VEPRASKAS, M.J.; LINDBO, D.L. Redoximorphic features as related to soil hydrology and hydric soil. In: LIN (Ed.). **Soil micromorphology**: studies management and genesis and hydrology. Amsterdam: Elsevier, 2012. p.143-172.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advance in Soil Science**, New York: Spriger-Verlag, 1985. p.1-70, v.3.

WILDING, L.; DRESS, L.R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L.; SMECK, N. E. HALL, G. F. (Ed.). **Pedogenesis and Soil Taxonomy I**. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier, 1983. p.83-116.

ZEILHOFER, P.; SCHESSL, M. Relationship between vegetation and environmental conditions in the northern Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Journal of Biogeography**, Oxford, v. 27, p.159-168, 1999.