



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Varição de atributos do solo ao longo de três topossequências no planalto do Rio Grande do Sul

Viviane Capoane¹, Tales Tiecher², Danilo Rheinheimer dos Santos³

¹Dr^a. em Geografia, Pesquisadora no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, Campus da UFSM, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-970, Bairro Camobi, Santa Maria (55) 3301-2001. capoane@gmail.com (autora correspondente). ²Dr. em Ciência do Solo, Professor Adjunto no Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 7712, CEP 91540-000 - Porto Alegre. (51) 3308-6040. tales.t@hotmail.com. ³Dr. em Ciência do Solo, Professor Titular no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-970, Bairro Camobi, Santa Maria (55) 33220-8000. danilonessa@gmail.com

Artigo recebido em 03/04/2017 e aceito em 30/05/2017

RESUMO

Este trabalho investigou os efeitos da topografia e das práticas de uso e manejo do solo na variabilidade de alguns atributos do solo ao longo de três topossequências localizadas no planalto do Rio Grande do Sul. As topossequências (Tps) estão inseridas em uma bacia hidrográfica situada no município de Júlio de Castilhos. Na Tp1 foram definidos quatro pontos de amostragem e na Tp2 e Tp3, cinco pontos. Em cada perfil foram coletadas amostras em cinco camadas de solo (0–5, 5–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). Em laboratório foram determinados os atributos: densidade, argila, pH em água, carbono (C) orgânico total, fósforo (P) total, P orgânico total, P disponível, óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) cristalinos e amorfos. Os resultados encontrados mostram que o movimento de sedimentos em superfície e através do perfil do solo é controlado pela posição, forma e declividade da encosta e, pelas atividades antrópicas como o uso e manejo do solo e aplicação de fertilizantes. Considerando as classes de uso da terra, os maiores teores de C e P (total, orgânico e disponível) foram obtidos na área úmida, seguido da lavoura e campo nativo. Considerando a posição na encosta os teores de C e P foram maiores na baixada seguido da base da encosta, topo e meia encosta. A condição hidromórfica ao longo das topossequências desempenhou um papel importante na disponibilidade de P, acúmulo C orgânico total e solubilização dos óxidos de Fe e Al.

Palavras-chave: Uso da terra, posição topográfica, perfil do solo, propriedades do solo.

Variation of soil attribute along of three toposequence in the Rio Grande do Sul plateau

ABSTRACT

This work investigated the effects of topography and land use and soil management practices on the variability of some soil properties along three toposequences located in the Rio Grande do Sul plateau, Southern Brazil. The toposequences (Tps) evaluated are from a watershed located in the municipality of Júlio de Castilhos. Soil samples were taken in four points in Tp1 and in five points in Tp2 and Tp3. In each point samples were taken at five depths (0–5, 5–10, 10–20, 20–40, and 40–60 cm). The soil properties evaluated were soil density, clay, pH in water, total organic carbon (C), total phosphorus (P), total organic P, available P, and amorphous and crystalline iron (Fe) and aluminum (Al) oxides. Results show that the transport of sediments on the surface and through the soil profile is controlled by topographic position, landform, slope, and also by the anthropic activities such as the use and management of the soil and the application of fertilizers. Considering the classes of land use, the highest levels of C and P (total, organic and available) were obtained in the wetlands, followed by the crop fields and natural grasslands. Considering the topographic position, the contents of C and P were higher in the floodplain followed by the base of the slope, top and middle slope. Hydromorphic conditions along the toposequences played an important role in P availability, total organic C accumulation and solubilization of Fe and Al oxides.

Keywords: Land use, topographic position, soil profile, soil properties.

Introdução

As propriedades do solo são fortemente influenciadas pelas complexas interações entre os fa-

tores (material de origem, clima, relevo, organismos e tempo), processos (adição, remoção, translocação e transformação) de formação do solo (Jenny, 1941) e, usos antrópicos (Saglam e Dengiz, 2012). A variabilidade das propriedades do solo na

paisagem tem efeitos profundos nos aspectos econômicos e ambientais (Umali et al., 2012), pois tem implicações no manejo agrícola (Kværnø et al., 2007), na gestão de nutrientes (Lal, 1998; Liu et al., 2009) e na sustentabilidade (Patzold et al., 2008).

Conforme Jenny (1941), Mulla e McBratney (2000) e Ahuja et al. (2002), a topografia exerce papel preponderante na variabilidade dos atributos do solo. Dessa forma, quaisquer variações nos processos geomorfológicos e hidrológicos influenciam os processos pedogênicos através do efeito na distribuição diferencial de água (transporte e armazenamento), sedimentos e materiais dissolvidos (Young e Hammer, 2000), determinando assim a distribuição lateral e vertical das propriedades químicas e físicas do solo (Moore et al., 1991).

Em uma toposequência as propriedades do solo variam devido ao grau de erosão, transporte e deposição de componentes químicos e particulados (Krasilnikov et al., 2005; Ritchie et al., 2007; Schwanghart e Jarmer, 2011). Esses processos influenciam fortemente a distribuição espacial de nutrientes e do carbono orgânico do solo em superfície (Zhu et al., 2014; Dessalegn et al., 2014), bem como a hidrologia da encosta e a produção e decomposição da serapilheira (Wang et al., 2011).

Vários estudos foram realizados nas últimas décadas para determinar os fatores que atuam na variabilidade das propriedades do solo ao longo das encostas. Brubaker et al. (1993) encontraram diferenças significativas entre as posições na paisagem para 13 propriedades do solo. Moore et al. (1993) atribuíram a variabilidade nas propriedades químicas e físicas do solo à inclinação, índice de umidade, aspecto e curvatura do plano em um estudo no nordeste do Colorado, EUA. McKenzie e Ryan (1999) usaram a curvatura do plano, área de dispersão e variáveis ambientais para prever os teores de fósforo (P) total e carbono total em áreas de montanha alpina e subalpina da Austrália. Canellas et al. (2000) investigaram os efeitos do relevo na distribuição das frações da matéria orgânica ao longo de uma toposequência localizada no campus da UFRJ em Seropédica. Os autores constataram que a posição na encosta influencia a dinâmica da água, que por sua vez determina os teores das frações da matéria orgânica, principalmente das frações de ácidos fúlvicos livres e ácidos fúlvicos, que são transportadas pelo fluxo lateral e vertical de água no relevo. Wang et al. (2001) consideraram a topografia como o fator dominante na variação das propriedades do solo devido à sua influência sobre o escoamento, drenagem, microclima e erosão, conseqüentemente, na formação do solo sob uma encosta semiárida do planalto de Loess na China. Takata et al. (2007) relataram que a distribuição do

carbono potencialmente mineralizável e do carbono orgânico do solo (COS) foi predito usando a elevação e a curvatura média como variáveis independentes. Hattar et al. (2010) relacionaram a distribuição de carbonatos totais e matéria orgânica no Mediterrâneo Oriental (Al-Muwaqqar/Jordânia), com a posição na encosta, declividade e forma da encosta. Mulugeta e Sheleme (2010) relataram que indicadores de qualidade do solo foram afetados por diferentes posições de paisagem, particularmente nos horizontes superficiais. Além disso, muitas propriedades do solo, incluindo a distribuição do tamanho de partícula, pH, nitrogênio (N), fósforo e teor de matéria orgânica variam com a posição na encosta (Miller et al., 1988; Wang et al., 2001; Mulugeta e Sheleme, 2010; Tang et al., 2010; Costa et al., 2013). Um denominador comum de todos esses estudos é a forte relação entre a posição topográfica com os teores de carbono orgânico e com os atributos físicos e químicos do solo.

O uso da terra e as práticas de manejo também influenciam os atributos do solo como o teor de nutrientes, os estoques, a dinâmica e as formas da matéria orgânica, principalmente na camada superficial (Bernoux et al., 2006; Brahim et al., 2009), além dos processos relacionados, como a erosão, a oxidação, a mineralização e a lixiviação (Liu et al., 2010). Santos (2004), em trabalho desenvolvido em uma toposequência na Paraíba, constatou que a conversão de vegetação nativa para a cultivada resulta na perda de nutrientes ao longo do declive e, com continuação do cultivo as áreas convexas (nas encostas) apresentam perdas progressivas de sedimentos, enquanto as áreas côncavas atuam como áreas de deposição. Faria et al. (2010) avaliaram as propriedades químicas e físicas do solo em uma toposequência caracterizada por apresentar uso com pastagem cultivada e Cerrado nativo no município de Colmeia, Tocantins. Os autores constataram que a conversão de Cerrado nativo para uso agropecuário reduziu os teores de P e, o cultivo em toposequência alterou as frações granulométricas, devido à erosão laminar. Dessalegn et al. (2014), em trabalho desenvolvido em toposequências do sul da Etiópia constataram que as propriedades químicas dos solos foram significativamente afetadas pelo uso da terra. Zhu et al. (2014) em trabalho desenvolvido em uma região montanhosa erodida do planalto Chinês, concluíram que o uso da terra, a posição topográfica (erosão e deposição) e suas interações regulam a acumulação de COS e N e suas frações lábeis.

Embora inúmeros trabalhos tenham investigado a relação entre os atributos do solo com a posição na encosta e uso da terra, no Rio Grande do Sul (RS) eles concentram-se em toposequências da depressão central (Udhe, 2009; Braga et al.,

2015) e, no rebordo do planalto (Meneses, 2008). Não foram encontrados trabalhos para a região do planalto do RS, especificamente em topossequências de solos derivados da Formação Tupanciretã. Assim, o objetivo deste estudo foi investigar como a topografia e as práticas de uso e manejo do solo influenciam a variabilidade de algumas propriedades do solo ao longo de três topossequências localizadas no planalto do Rio Grande do Sul, em solos cujo material de origem são arenitos fluviais da Formação Tupanciretã.

Material e Métodos

Área de Estudo

As topossequências estudadas estão inseridas em uma bacia hidrográfica agrícola localizada

no Município de Júlio de Castilhos, região central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1).

O clima da região é o subtropical medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas. A temperatura média anual varia entre 17–20°C; a temperatura média do mês mais frio oscila entre 11–14°C; a temperatura média do mês mais quente varia entre 23–26°C e; a precipitação fica entre 1500–1700 mm (Rossato, 2011). O material de origem são arenitos de origem fluvial pertencentes a Formação Tupanciretã (Menegotto et al., 1968), que estão estratigraficamente acima da Formação Serra Geral. O relevo é constituído por colinas suavemente onduladas e a classe de solo predominante na bacia hidrográfica é Argissolo Vermelho no topo de coxilhas, Argissolo Bruno no terço médio e inferior das encostas e Gleissolos nas baixadas (Capoane et al., 2015).

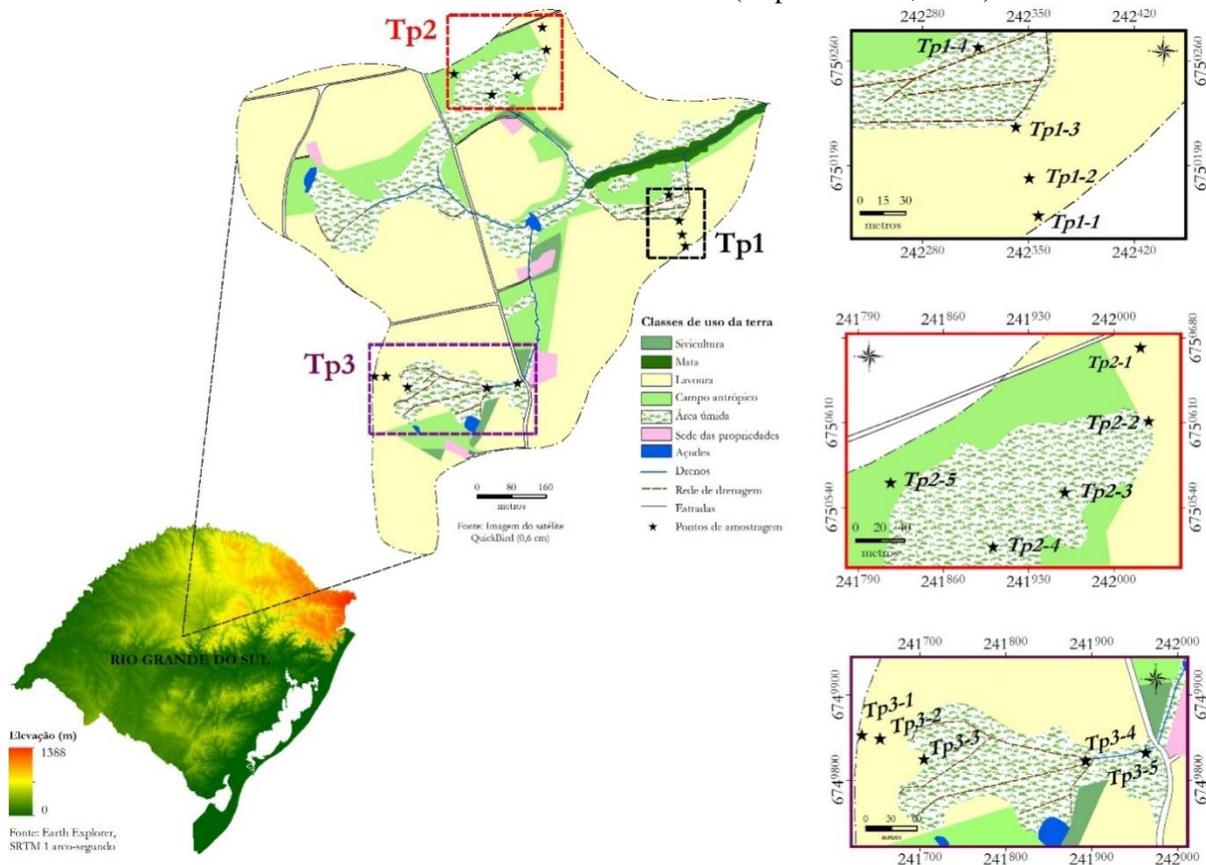


Figura 1. Localização dos pontos de amostragem de solo nas topossequências, Júlio de Castilhos, RS.

Caracterização das topossequências

Na topossequência 1 (Tp1) foram definidos quatro pontos de amostragem de solo e, nas topossequências 2 (Tp2) e 3 (Tp3), cinco pontos. Na Tp1 a amplitude entre os pontos amostrados é de aproximadamente 11 metros e o comprimento de rampa entre o Tp1-1 e o Tp1-4 é de 120 metros. Os usos da terra nos pontos amostrados são: lavoura

(Tp1-1, Tp1-2 e Tp1-3) e área úmida drenada em pousio (Tp1-4). Entre os pontos de coleta Tp1-3 e Tp1-4 há três drenos canalizados (Figura 2).

Na Tp2 a amplitude entre os pontos é de aproximadamente 11 metros e a distância entre o ponto da meia encosta (Tp2-1) até a baixada (Tp2-3) é de 100 metros. Nessa topossequência foram coletadas amostras de solo em dois pontos na área úmida não drenada.

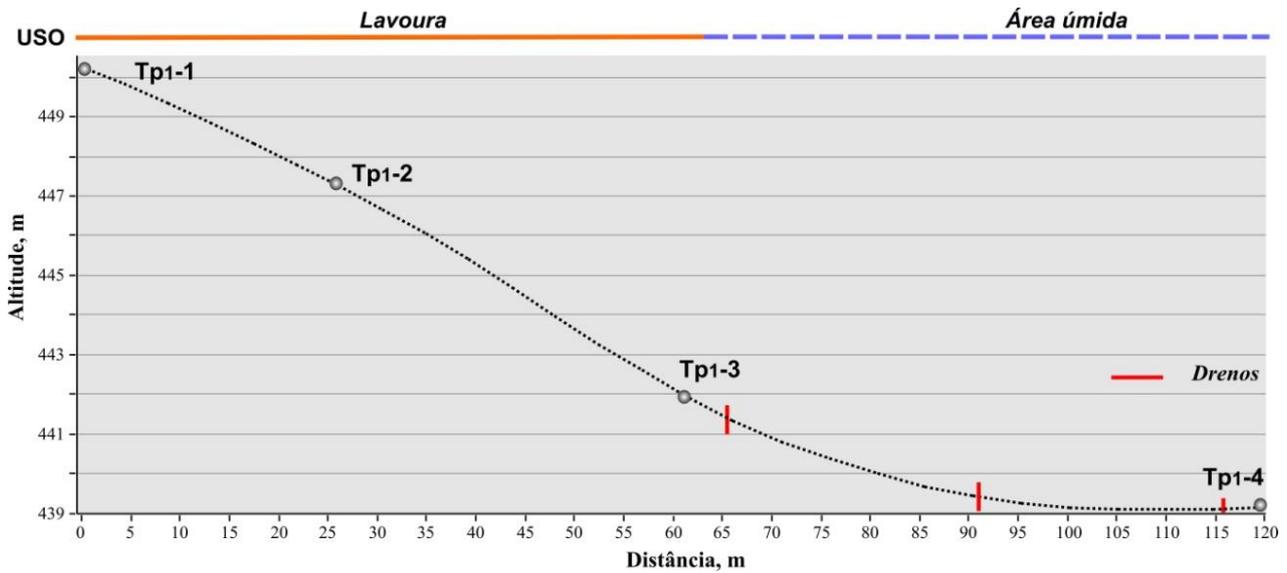


Figura 2. Gráfico ilustrando a localização dos perfis de amostragem de solo na topossequência 1, gerado a partir de um modelo digital de elevação com 60 cm de resolução de pixel obtido a partir de um levantamento planialtimétrico com GPS/GNSS/RTK no ano de 2012.

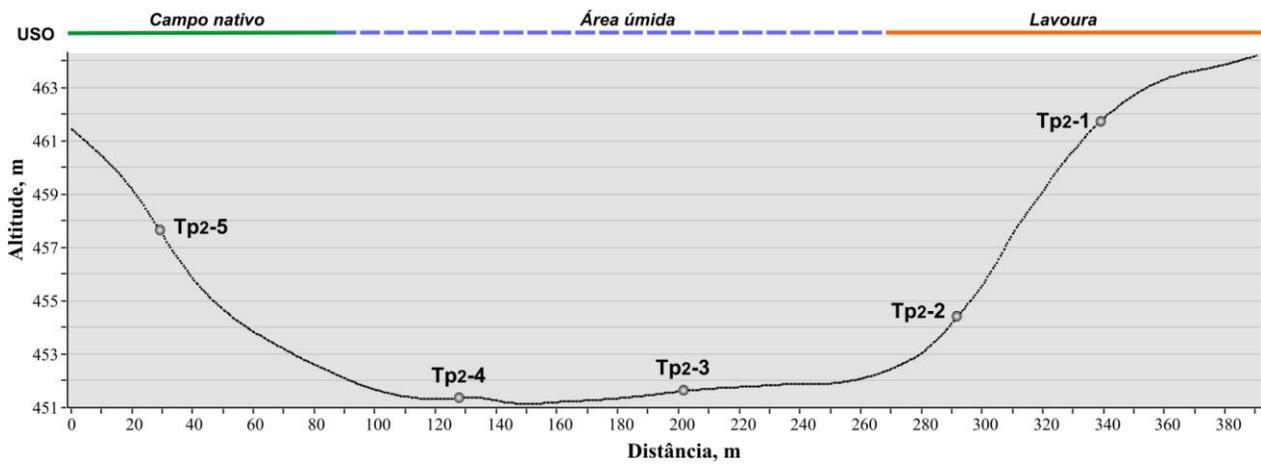


Figura 3. Gráfico ilustrando a localização dos perfis de amostragem de solo na topossequência 2, gerado a partir de um modelo digital de elevação com 60 cm de resolução de pixel obtido a partir de um levantamento planialtimétrico com GPS/GNSS/RTK no ano de 2012.

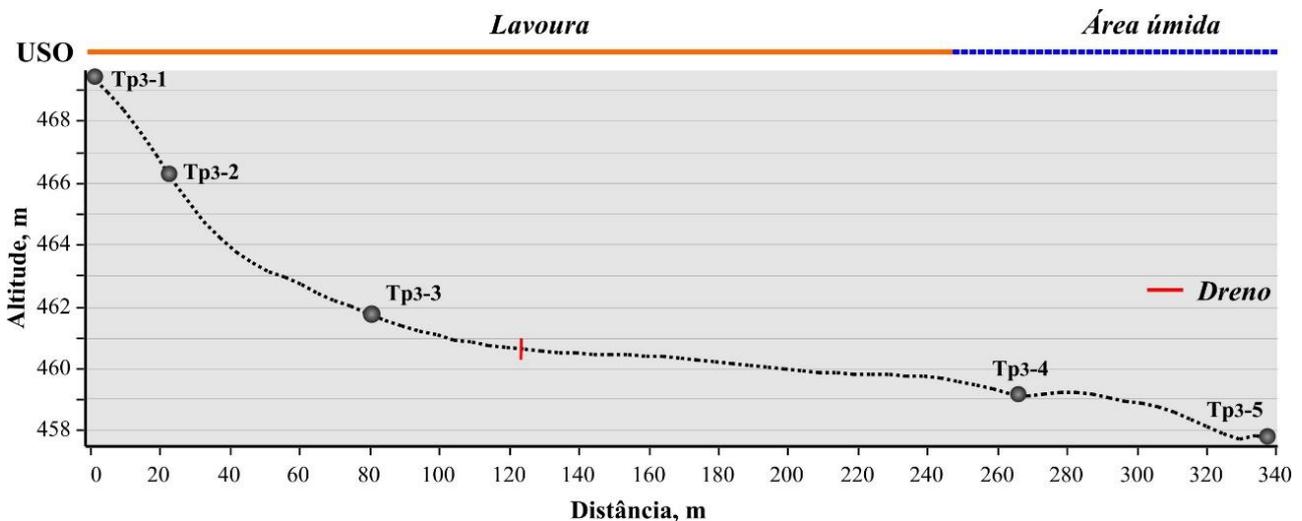


Figura 4. Gráfico ilustrando a localização dos perfis de amostragem de solo na topossequência 3, gerado a partir de um modelo digital de elevação com 60 cm de resolução de pixel obtido a partir de um levantamento planialtimétrico com GPS/GNSS/RTK no ano de 2012.

Também, optou-se por incluir um perfil de amostragem na meia encosta (Tp2-5), na vertente da sequência (Figura 3), que se constitui em uma terceira topossequência, pois o mesmo está inserido em área de campo nativo e poderia indicar o comportamento dos atributos do solo no perfil quando não há revolvimento e adição de fertilizantes e corretivos de acidez. Os usos da terra nos pontos amostrados são: lavoura (Tp2-1 e Tp2-2), área úmida (Tp2-3 e Tp2-4) e campo nativo (Tp2-5). Tanto a área de campo nativo quanto a úmida são utilizadas para o pastejo do gado durante todo o ano.

Na Tp3 a amplitude entre os pontos da baixada (Tp3-5) e o topo da encosta (Tp3-1) é de aproximadamente 12 metros e a distância entre eles é de 340 metros (Figura 4). Nessa topossequência foram coletadas amostras de solo em dois pontos em área úmida drenada (Tp3-4 e Tp3-5) e três em lavoura (Tp3-1, Tp3-2 e Tp3-3).

Coleta de solo e análises laboratoriais

As amostras de solo foram coletadas nos meses de julho e agosto de 2013. Em cada perfil foram coletadas amostras de solo em cinco camadas (0–5 (a), 5–10 (b), 10–20 (c), 20–40 (d), 40–60 (e) cm), totalizando 70 amostras de solo. Em laboratório, as mesmas foram secas em estufa de circulação forçada de ar à $\pm 50^\circ\text{C}$ e peneiradas em malha de 2 mm. Posteriormente, procederam-se as determinações dos atributos: densidade (Ds), argila, pH em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), carbono orgânico total (COT), fósforo total (PT), fósforo orgânico total (POT), fósforo disponível (PD), óxidos de ferro e alumínio cristalinos (Fe_{DCB} e Al_{DCB}) e amorfos (Fe_o e Al_o).

A Ds foi determinada pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 1997). O $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ do solo foi determinado utilizando um pHmetro de bancada conforme Tedesco et al. (1995). A granulometria foi determinada pelo método proposto por Muggler et al. (2007), utilizando um analisador de distribuição de tamanho de partículas por multilongitude de onda, modelo LS 13 320. Os valores até 2 μm foram atribuídos à fração argila.

O teor de COT foi estimado pelo método de oxidação úmida com dicromato de potássio e ácido sulfúrico (Walkley e Black, 1934, modificado por Tedesco et al., 1995).

Os teores de PT foram determinados por digestão com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio na presença de cloreto de magnésio saturado (Olsen e Sommers, 1982). O POT foi determinado pelo método de ignição do solo a 550°C , com posterior extração com ácido sulfúrico $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, sendo a quantidade de P orgânico obtido pela diferença entre o P extraído da amostra ignificada e não

ignificada (Olsen e Sommers, 1982). O PD foi extraído conforme o método descrito por Tedesco et al. (1995), utilizando resina de troca aniônica. O P dos extratos ácidos foi quantificado pelo método de Murphy e Riley (1962), utilizando um espectrofotômetro UV-visível.

A quantificação dos teores e formas de ferro (Fe) e alumínio (Al) de alta e baixa cristalinidade foi determinada pelo método de dissolução seletiva por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra e Jackson, 1960) e do oxalato ácido de amônio no escuro (o) (McKeague e Day, 1966), respectivamente. A extração com oxalato ácido de amônio, por ser um agente complexante, retira as formas de Al e Fe mal cristalizadas, principalmente a ferrihidrita (Schwertmann e Taylor, 1989). Este método também pode extrair aluminossilicatos amorfos (Jackson et al., 1986). Para separar melhor os teores de Fe e Al de baixa e alta cristalinidade, optou-se por apenas uma extração com oxalato. A leitura nos extratos foi realizada por espectrometria de absorção atômica (EAA).

Análise dos dados

Os valores dos atributos químicos (g kg^{-1} e mg kg^{-1}) e físicos (g cm^{-3} e %) do solo obtidos em laboratório foram tratados com base em Log_{10} buscando-se a linearização dos dados. Posteriormente os mesmos foram submetidos análise por componentes principais (CPs) a fim de reduzir o conjunto inicial de dados. Assim, o conjunto inicial de 11 variáveis passou a ser caracterizado por duas novas variáveis latentes ortogonais, o que possibilitou sua localização em figuras bidimensionais (Hair et al., 2005). A análise, padronização e plotagem foram realizadas no programa PAST (Hammer et al., 2013). Os atributos do solo que mais contribuíram para explicar a variância total foram apresentados e discutidos de forma gráfica.

Resultados e discussão

Análise de componentes principais

Na Tp1, as duas primeiras CPs explicaram 73,4% da variância total, sendo 51,6% na CP1 e 21,8% na CP2. Os pesos entre as variáveis e as componentes principais permitiu caracterizar os atributos do solo que mais contribuíram para a diferenciação dos pontos de amostragem e camadas de solo. Na CP1 os atributos que mais contribuíram foram: COT, POT, densidade, Al_{DCB} , PD e Fe_{DCB} (Tabela 1). Para a CP2, os atributos que mais contribuíram foram o pH e o PT (Tabela 1). Esses atributos foram responsáveis pela diferenciação horizontal e vertical em função da posição na encosta e uso da terra.

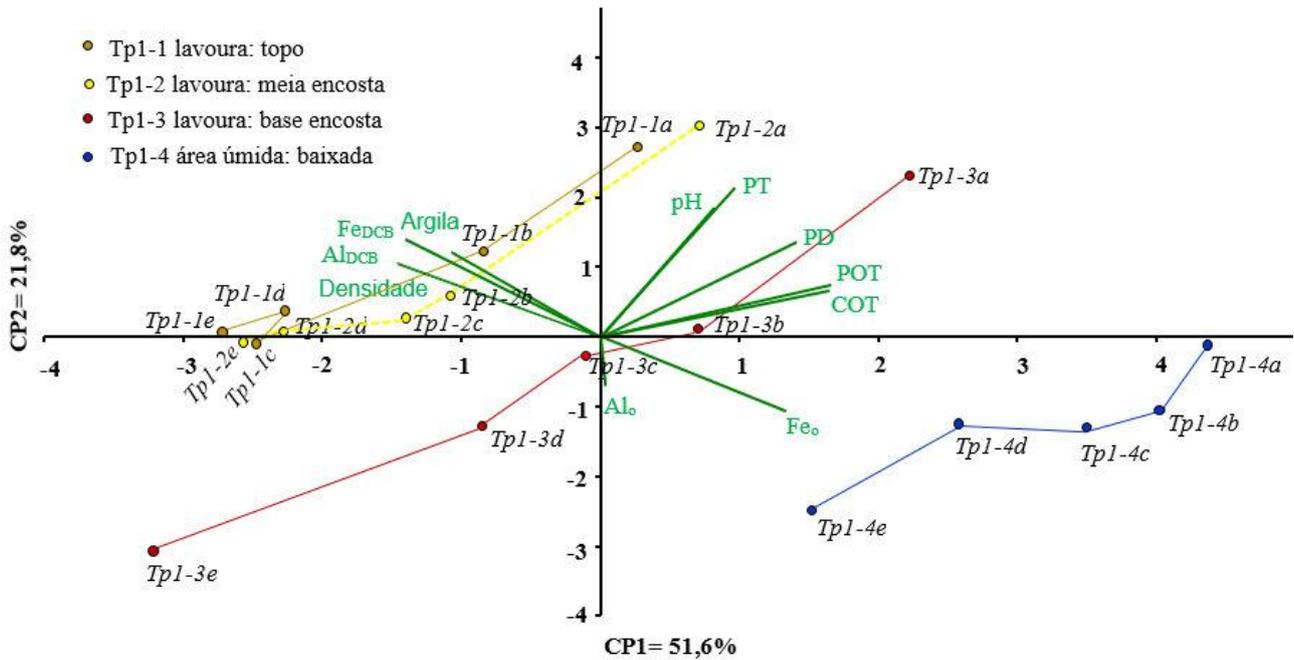


Figura 5. Biplot com a dispersão dos escores das duas primeiras componentes na topossequência 1.

Verifica-se que os pontos de coleta nas lavouras (Tp1-1, Tp1-2 e Tp1-3) estão mais correlacionados entre si do que o Tp1-4, amostrado em área úmida drenada (Figura 5). Nas lavouras C e P diferenciam as camadas de solo e os demais parâmetros diferenciam os pontos amostrados na topossequência.

De modo geral, fica claro que quanto mais antropizado o ponto de coleta, maior a distância

vertical entre as camadas de solo (Figura 5). Isso ocorre porque os atributos avaliados são indicativos da influência antrópica, seja através da aplicação de fertilizantes fosfatados ou pelo manejo inadequado do solo que causa a erosão e compactação, ainda, pela drenagem de áreas úmidas que provoca a perda de carbono e nutrientes. Fica evidente também, a influência do relevo na distribuição espacial e vertical de fósforo e carbono do solo.

Tabela 1. Contribuição das variáveis (%) para as componentes principais (CP1 e CP2), nas três topossequências estudadas, Júlio de Castilhos, Rio Grande do Sul.

Atributo	Topossequência 1		Topossequência 2		Topossequência 3	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Densidade	<u>0,13</u>	0,06	<u>0,15</u>	0,01	0,11	0,04
Argila	0,07	0,07	0,00	<u>0,29</u>	0,05	<u>0,22</u>
pH	0,02	<u>0,25</u>	0,00	<u>0,22</u>	0,04	0,04
Fe _{DCB}	<u>0,11</u>	0,11	0,13	0,11	0,00	<u>0,24</u>
Fe _o	0,10	0,04	0,04	0,01	<u>0,13</u>	0,01
Al _{DCB}	<u>0,12</u>	0,07	0,10	0,14	0,05	<u>0,24</u>
Al _o	0,00	0,04	0,03	0,00	<u>0,13</u>	0,07
COT	<u>0,15</u>	0,02	<u>0,18</u>	0,04	<u>0,17</u>	0,01
PT	0,05	<u>0,23</u>	0,11	0,16	<u>0,13</u>	0,00
POT	<u>0,14</u>	0,03	<u>0,16</u>	0,00	<u>0,14</u>	0,01
PD	<u>0,11</u>	0,09	0,11	0,03	0,04	0,12

Valores sublinhados explicaram mais de 70% da contribuição individual para cada componente principal.

Na topossequência 2 as duas primeiras componentes principais foram responsáveis por

65,7% da variância total, sendo 42,9% na CP1 e 22,8% na CP2 (Figura 6). Os atributos que mais

contribuíram para a diferenciação na CP1 foram: COT, POT e densidade. Na CP2, os atributos que mais contribuíram para a diferenciação entre os pontos de amostragem e camadas de solos foram argila e pH (Tabela 1). Assim como na Tp1, C e P diferenciam em profundidade e os demais parâmetros diferenciam os pontos amostrados ao longo da topossequência.

A análise de componentes principais resalta a diferença entre ambientes, visto que os três

ambientes estudados (lavouras, campo nativo e áreas úmidas) estão nitidamente separados (Figura 6). Os pontos das lavouras são similares e é possível visualizar a influência da posição na encosta. A pequena distância vertical e horizontal entre as camadas de solo no perfil de amostragem em campo nativo (Figura 6) é indicativo do comportamento dos atributos físicos e químicos do solo quando não há revolvimento e adição de P.

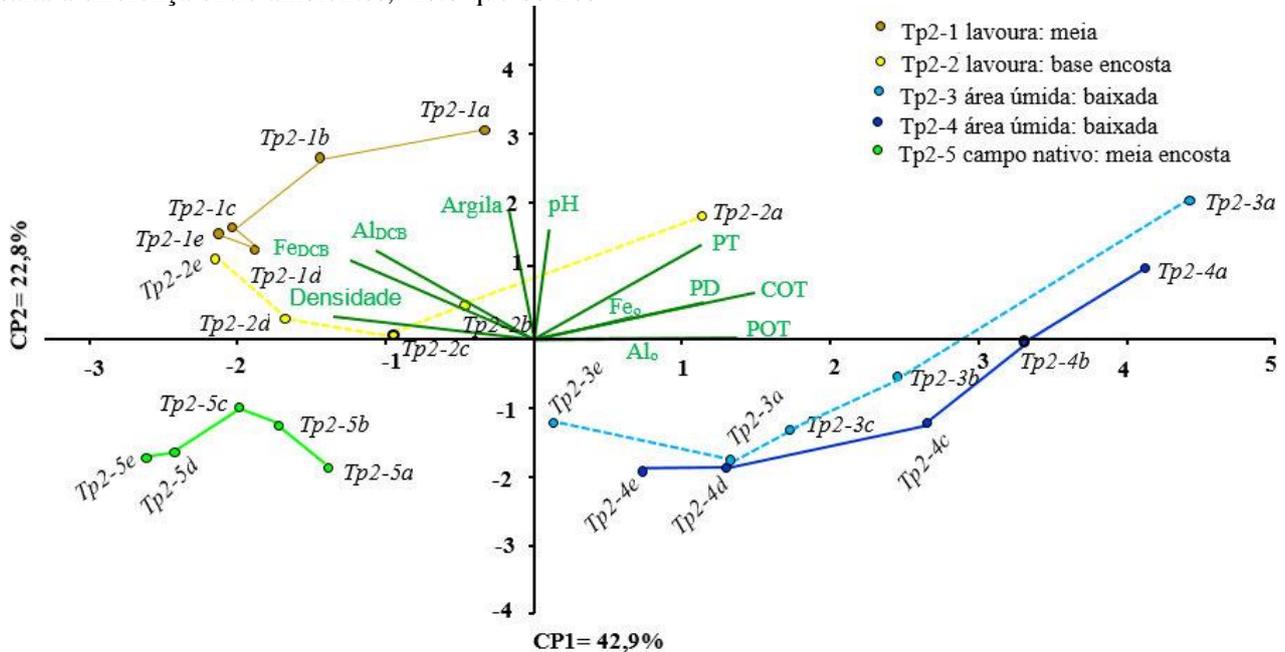


Figura 6. Biplot com a dispersão dos escores das duas primeiras componentes na topossequência 2.

Na Tp3, as duas primeiras CPs explicaram 74,1% da variância total, por apresentarem elevados autovalores. A CP1 explicou 49,6% da variância e a CP2 24,5%. Os atributos que mais contribuíram para a variação da CP1 foram: COT, POT, PT, Al_o e Fe_o (Tabela 1). Na CP2 os atributos que mais contribuíram foram: Fe_{DCB}, Al_{DCB} e argila (Tabela 1). Nessa topossequência, a diferenciação entre os pontos e camadas de solo também ocorreu em função do uso da terra e posição na encosta (Figura 7). Porém, os atributos que contribuíram para a diferenciação nas lavouras foram os óxidos cristalinos, pH e densidade. As áreas úmidas apresentaram grande distância horizontal e pequena vertical, consequência da deposição de material erodido das áreas a montante e do não revolvimento do solo. Nesta topossequência as áreas úmidas drenadas apresentaram comportamento similar ao das áreas úmidas não drenadas (Tp2), o que foi atribuído a deposição de sedimento e nutrientes antes da chegada aos drenos, fato que não ocorre na área úmida da Tp1, pois o dreno contorna a base da encosta (Figuras 1 e 2), fazendo com que o material perdido

das lavouras atinja diretamente o canal com o dreno e, consequentemente, os cursos d'água.

A análise de CPs nas três topossequências mostra que os atributos densidade, Fe, Al, argila e pH estão diferenciando os pontos de amostragem ao longo da encosta. Por outro lado, P e C estão discriminando as camadas. Ficou clara a distinção dos ambientes área úmida, campo nativo e lavoura, evidenciando que os atributos do solo são grandemente afetados pelo uso da terra e pelo relevo. Os valores encontrados nas amostras do campo nativo são reflexo de ambientes onde não há revolvimento do solo e adição de fertilizantes. Nas áreas úmidas foi possível observar o efeito da abertura de drenos e do manejo inadequado das áreas agrícolas, pois o P que é um nutriente adicionado nas lavouras foi um dos principais atributos responsáveis pela diferenciação dos pontos de amostragem. Considerando que todos os atributos avaliados contribuíram para a diferenciação entre os pontos e camadas, em pelo menos uma das topossequências e CPs (Tabela 1), os mesmos foram apresentados e discutidos de forma gráfica.

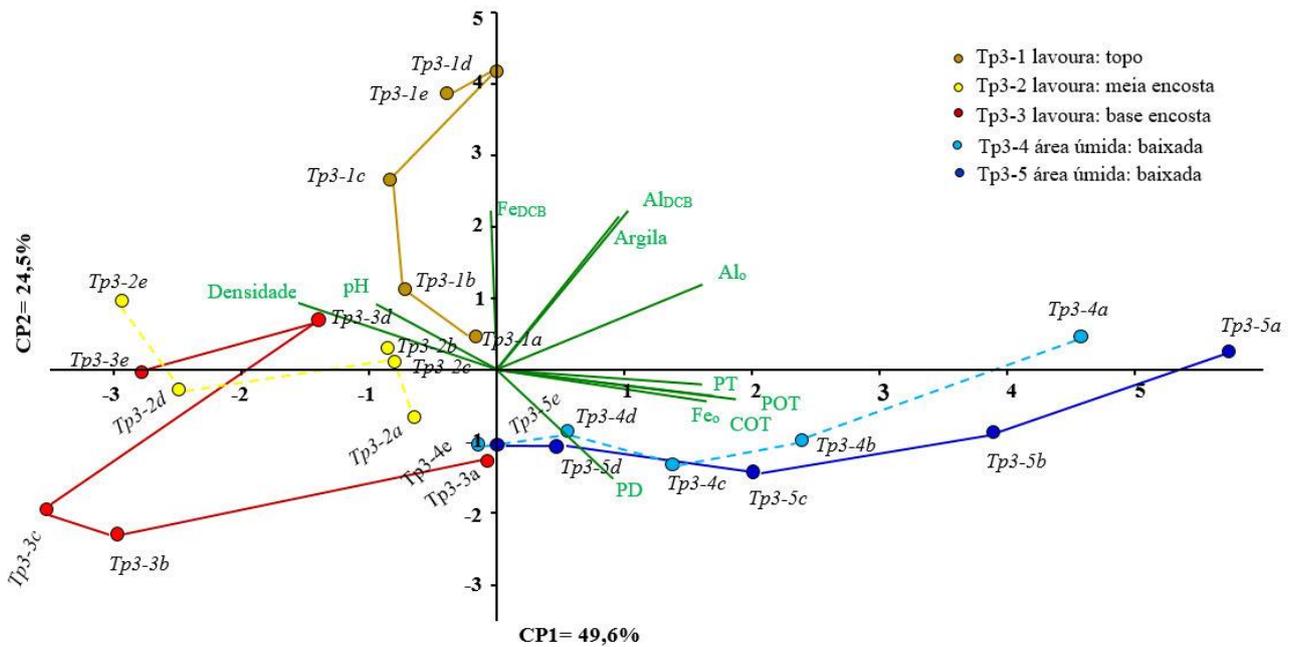


Figura 7. Biplot com a dispersão dos escores das duas primeiras componentes na topossequência 3.

Variação dos atributos do solo ao longo das topossequências

Na topossequência 1, nos três pontos de amostragem de solo na lavoura, o pH_{H2O} da camada de 0–5 cm estava acima de 5,5, devido à calagem realizada na lavoura, bem como o sistema de manejo plantio direto com revolvimento mínimo do solo. Nas demais camadas o pH ficou abaixo de 5,5 (Figura 8A).

Na topossequência 2, nos dois pontos amostrados em área de lavoura o pH em água também estava acima de 5,5, sendo que no Tp2-2 isso ocorreu até a camada de 20 cm (Figura 8B), provavelmente pelo revolvimento mais profundo do solo ou, pela deposição de sedimento com pH mais elevado, uma vez que esse ponto se localiza na base da encosta.

Na Tp3, os três pontos amostrados em área agrícola apresentaram pH_{H2O} acima de 5,5 nas duas primeiras camadas (Figura 8C). O ponto amostrado no topo da coxilha apresentou os maiores valores nas camadas mais profundas, o que pode ser decorrência da incorporação do calcário em profundidade com arações e gradagens. Nos pontos da meia encosta e base da encosta os valores decaíram aproximando-se dos encontrados em área úmida.

Embora a camada 0–5 cm tenha apresentado valores de pH superiores a 5,5 em todos os

pontos amostrados em áreas agrícolas, os baixos valores encontrados em profundidade podem resultar em problemas para as plantas, uma vez que nessa situação, ele influencia a disponibilidade de nutrientes e aumenta a concentração de Al³⁺ que é tóxico para as plantas (Alloway, 1990; Ferreira et al., 2006). Isso promove o crescimento radicular apenas na superfície, diminuindo a quantidade de água e nutrientes explorados pelas plantas (Rheinheimer et al., 1992).

Nas áreas úmidas, todas as camadas de solo avaliadas apresentaram valores de pH inferiores a 5,5 (Figura 8). Isso ocorre, pois com o aumento da matéria orgânica no solo, a decomposição dos resíduos vegetais promove a acidificação do solo (Seber et al., 2006; Ebeling et al., 2008).

No ponto de amostragem em área de campo nativo (Tp2-5) o pH_{H2O} manteve-se abaixo de 4,5 até a camada de 10 cm, com um leve aumento nas demais camadas, atingindo 4,64 na camada 20–40 cm (Figura 8B). Os valores de pH obtidos neste ponto indicam a natureza ácida dos solos derivados da Formação Tupanciretã.

Nas três topossequências, a média de pH nas duas primeiras camadas (0–5 e 5–10 cm) para as diferentes classes de uso foi de 6,5±0,18 e 5,8±0,24 nos solos cultivados; 5,1±0,06 e 4,7±0,08 nas áreas úmidas e; 4,4 no campo nativo.

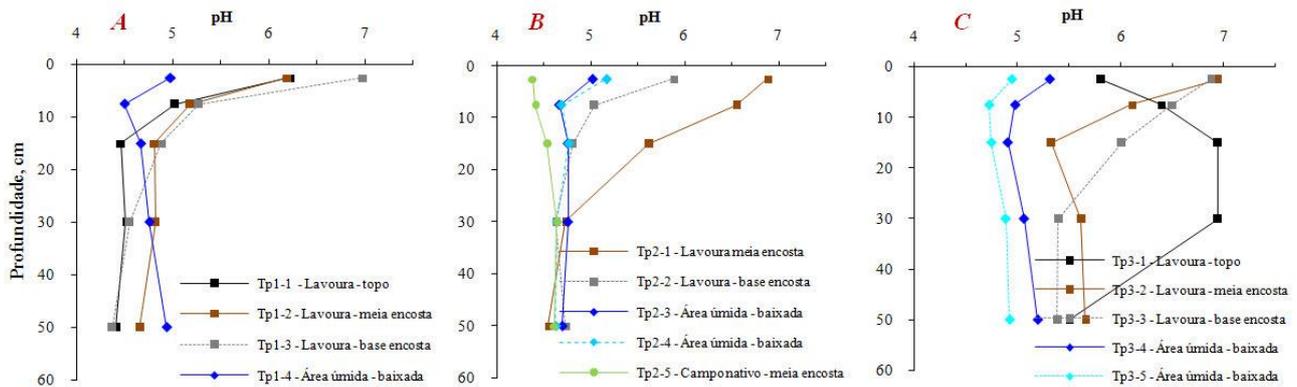


Figura 8. Gráficos ilustrando os valores de pH_{H2O} obtidos nas amostras das topossequências 1 (A), 2 (B) e 3 (C).

Em todos os pontos de amostragem os teores de COT foram maiores na camada superficial, o que decorre da combinação de resíduos culturais e biomassa radicular (Figura 9). Abaixo da profundidade máxima de enraizamento, os teores de carbono orgânico decrescem e a distribuição pode ser considerada estocástica e fortemente influenciada por processos pedológicos (Rumpel e Kogel-Knabner, 2011).

Nas lavouras, os pontos amostrados no topo da encosta apresentaram teores de COT maiores que os da meia encosta, ambiente de perda de material, e estes menores que os da base da encosta, onde há o favorecimento do acúmulo de parte do material erodido em função da diminuição de energia dos fluxos superficiais. Os teores de COT nas áreas agrícolas foram similares nas três topossequências, média de $13,2 \pm 1,20 \text{ g kg}^{-1}$ na camada 0–5 cm, sendo os teores influenciados pelo manejo do solo e relevo. O mesmo foi observado por Ajami et al. (2016).

Em ambientes cultivados, o revolvimento dos solos favorece a aeração e conseqüentemente a mineralização da matéria orgânica (Six et al., 2000; Bruun et al., 2015). Nesses locais o aporte de materiais orgânicos também é menor, o que explica os resultados observados nas três topossequências (Figura 9). Ainda, conforme Costa et al. (2008), a ausência de cobertura do solo, permite a incidência direta de raios solares, aumentando a temperatura do solo, intensificando a atividade microbiana, conseqüentemente, aumenta a emissão de CO₂ do solo para a atmosfera.

As amostras de solo coletadas em área de campo nativo apresentaram os menores teores de carbono orgânico total, com pequena variação em profundidade (Figura 9B). Os baixos teores de carbono no solo são justificados pela ausência de manejo e pastejo intensivo que resulta em pouquíssimo aporte de resíduos vegetais e, redução na distribuição do sistema radicular. Estes resultados são semelhantes aos relatados por Oades (1978).

Nas áreas úmidas, o ponto de amostragem da Tp1 apresentou teor médio de COT no perfil de $17,6 \pm 3,9 \text{ g kg}^{-1}$ de carbono. Na Tp2, os pontos Tp2-3 e Tp2-4 apresentaram teor médio no perfil de $35,6 \pm 16,4$ e $37,4 \pm 11,5 \text{ g kg}^{-1}$ de C, respectivamente. Na Tp3, os pontos Tp3-3 e Tp3-4 apresentaram teor médio no perfil de $21,5 \pm 6,6$ e $25,5 \pm 7,8 \text{ g kg}^{-1}$ de C, respectivamente. Os maiores teores de COT obtidos nas áreas úmidas (média de $59,1 \pm 11,48 \text{ g kg}^{-1}$ na camada 0–5 cm), devem-se ao aporte de resíduos vegetais e, ao ambiente de hidromorfia que diminui a velocidade de decomposição da matéria orgânica do solo. Já a diferença exorbitante entre as áreas úmidas (Figura 9), decorre da abertura de drenos que, conforme Hooijer et al (2010; 2012), favorece a oxidação e emissão de CO₂.

Considerando a posição na encosta, os teores de COT foram em ordem decrescente: > baixada > base encosta > topo > meia encosta.

Em trabalho desenvolvido por Capoane et al. (2016a) na bacia hidrográfica onde estão inseridas as topossequências, os autores avaliaram os efeitos do uso da terra (mata, área úmida, lavoura e campo nativo) e declividade (0–3, 3–8 e 8–20%) sobre os teores de carbono orgânico total. Os autores constataram que os processos de redistribuição e deposição de carbono na bacia hidrográfica são grandemente influenciados pelo uso da terra e pelas formas do relevo. Nas lavouras os menores teores de COT foram encontrados na meia encosta com declive entre 8–20% e as maiores em vertentes côncavas convergentes na posição inferior da encosta. As áreas de campo nativo apresentaram os menores teores de carbono orgânico total dentre as classes de uso da terra avaliadas. Já os maiores teores foram obtidos nas áreas úmidas, comprovando o grande potencial desses locais no sequestro de carbono.

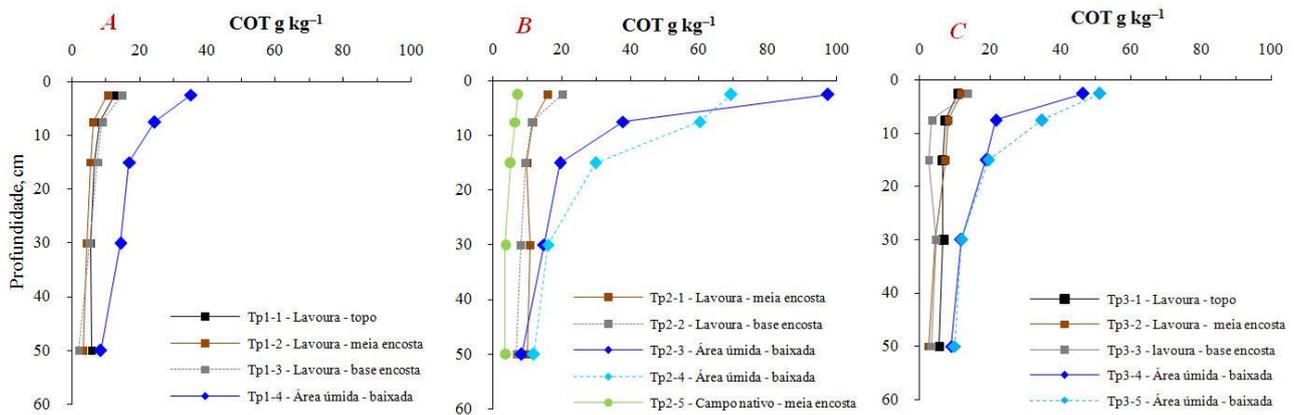


Figura 9. Teores de Carbono Orgânico Total obtidos nas amostras das topossequências 1 (A), 2 (B) e 3 (C).

Nos perfis de amostragem em área de lavoura, percebe-se claramente a forte influência do relevo no transporte de materiais (Figura 10). Os valores de PT na camada 0–5 cm das amostras coletadas no perfil do topo da coxilha foram maiores que o da meia encosta (ambiente de perda) e estes menores que o da base da encosta (ambiente de deposição). Nas demais camadas as concentrações de PT decaíram mantendo-se próximas (Figura 10ABC), o que decorre da baixa mobilidade do P no perfil do solo. A média de PT na camada 0–5 cm das amostras coletadas nas áreas agrícolas foi de $228 \pm 16 \text{ mg kg}^{-1}$.

Nas áreas úmidas, o ponto Tp1-4 apresentou as menores concentrações de PT (Figura 10A), o que foi atribuído ao dreno que contorna a base da encosta que impede a deposição do material perdido das lavouras (Figura 1). Embora a área úmida

da Tp2 não tenha sido drenada, a área úmida drenada da Tp3 apresentou maiores teores de PT na camada 0–5 cm (Figura 10BC). Isso decorre da feição do relevo que possibilita que parte do material perdido das encostas deposite antes de atingir o canal com o dreno, também, às maiores doses de P adicionadas pelo agricultor, fato constatado em campo. As maiores concentrações de PT obtidas nas áreas úmidas, média de $346 \pm 42,78 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada 0–5 cm, demonstram o grande potencial desses locais como filtro de poluentes.

No ponto de amostragem em campo nativo (Tp2-5) foram obtidas as menores concentrações de fósforo total em todo o perfil de solo (Figura 10B), o que decorre da não aplicação de fertilizantes fosfatados. Os valores encontrados também indicam que o material de origem é pobre em fósforo.

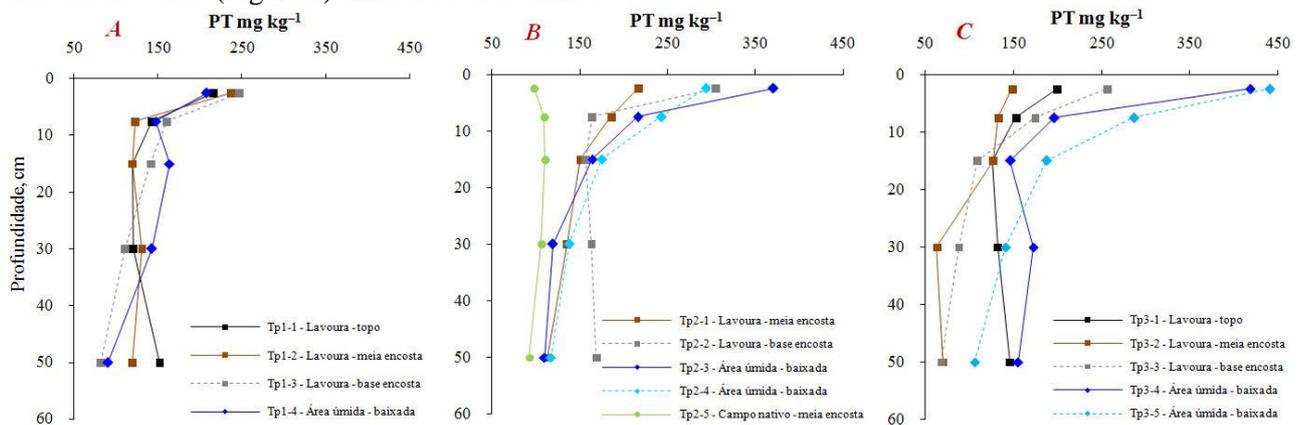


Figura 10. Teores de Fósforo Total nas amostras das topossequências 1 (A), 2 (B) e 3 (C).

As concentrações de POT foram similares nas lavouras (Figura 11ABC). Na camada 0–5 cm as concentrações foram de 108 mg kg^{-1} no Tp3-1, 116 mg kg^{-1} no Tp3-2 e 130 mg kg^{-1} no Tp3-3. Na topossequência 2 os valores encontrados foram $94,8 \text{ mg kg}^{-1}$ no Tp2-1 e $126,0 \text{ mg kg}^{-1}$ no Tp2-2. Na topossequência 1 os valores encontrados foram $111,2$; $109,5$ e $125,4 \text{ mg kg}^{-1}$ nos pontos Tp1-1, Tp1-2 e Tp1-3, respectivamente. Em profundidade,

as concentrações decaíram e tenderam às encontradas em área de campo nativo onde não há aplicação de fertilizante fosfatado. Nesta classe de uso a média de POT foi de $115 \pm 4 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada superficial (0–5 cm).

As maiores concentrações de POT foram obtidas nos pontos de amostragem em área úmida (Figura 11), com média de $281 \pm 32 \text{ mg kg}^{-1}$ (camada 0–5 cm). Conforme Mitsch e Gosselink (1993) e Kadlec e Knight (1996), solos de zonas

úmidos são caracterizados pelo acúmulo de matéria orgânica. Devido ao baixo teor de matéria mineral e alto teor de matéria orgânica, uma grande proporção de P desses locais é armazenado nas formas orgânicas (Reddy et al., 1998). Em geral, as grandes

quantidades de P orgânico podem ser imobilizadas e apenas uma pequena porção do conteúdo total de P orgânico é biodisponível, a maior parte é estabilizada em compostos orgânicos relativamente recalcitrantes (Dunne e Reddy, 2005).

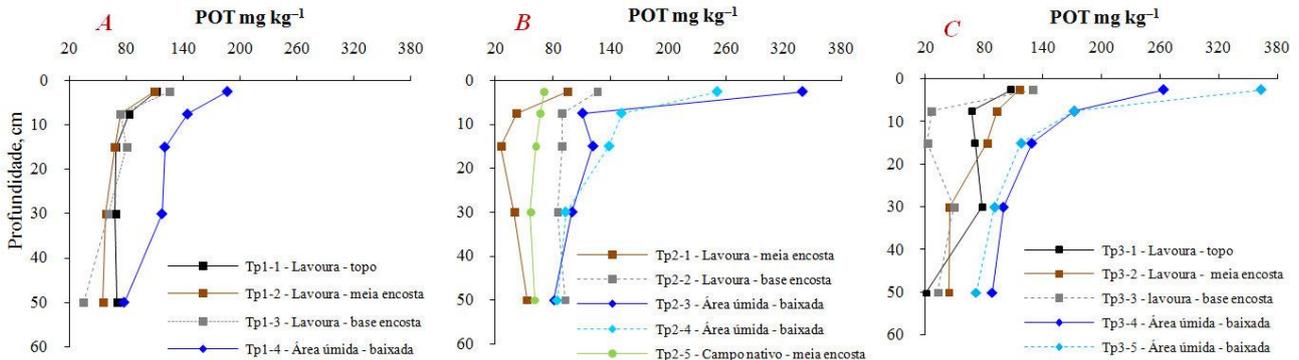


Figura 11. Teores de Fósforo Orgânico Total nas amostras das toposequências 1 (A), 2 (B) e 3 (C).

Na Tp1 o PD apresentou as maiores concentrações na baixada (Tp1-4) seguido do Tp1-3, base da encosta (Figura 12A). Assim como para as demais formas de P avaliadas, percebe-se um enriquecimento no sentido do gradiente encosta, contudo o material que é perdido via escoamento superficial não chega até a área úmida, pois o dreno contorna a base da encosta, favorecendo a saída de sedimento e nutrientes da bacia hidrográfica.

Na Tp2, os teores de PD no ponto da meia encosta em área de lavoura foi similar ao encontrado na Tp1. Também foi observado um enriquecimento de PD na camada superficial de acordo com o gradiente da encosta (Figura 12B). O ponto de amostragem em área de campo nativo apresentou as menores concentrações de PD em todas as camadas avaliadas. Conforme Rheinheimer et al. (2008), em sistemas onde não há adição de P a sua disponibilidade está intimamente relacionada à ciclagem das formas orgânicas. Como o PT e POT nesse ponto apresentaram baixas concentrações, consequentemente, a disponibilidade de PD também será baixa. Na área úmida (Tp2-3 e Tp2-4) os valores obtidos foram superiores aos encontrados na Tp1 (Tp1-4), isso porque, a zona úmida funciona como tampão para o material que sai da lavoura.

Na Tp3 os teores de PD em área agrícola foram maiores no ponto da meia encosta na camada 0–5 cm (Figura 12C). Nas áreas úmidas os valores obtidos foram intermediários entre a Tp1 e a Tp3. Em profundidade os valores decaíram, sendo similares nas três toposequências.

As maiores concentrações de PD obtidas na área úmida não drenada (Tp2) relacionam-se a ação da decomposição da matéria orgânica, que libera compostos orgânicos, os quais apresentam comportamento aniônico no solo e podem agir na disponibilização de P (Guppy et al., 2005; Zamuner

et al., 2008). Também, pelo fato de que em ambiente anóxico os óxidos de Fe e Al são reduzidos e solubilizados, dissolvem e, liberam PO_4^{3-} para a solução (Dunne e Reddy, 2005). Nas lavouras, além do teor de P do solo estar sendo condicionado pela topografia, o baixo teor de matéria orgânica e o baixo pH encontrado nestas áreas podem estar influenciando a presença de P, pois esse elemento tem sua disponibilidade diminuída em condições de baixo teor de matéria orgânica (Costa et al., 2013) e de pH baixo (Kabata-Pendias e Pendias, 1992).

A média de PD na camada 0–5 cm nas três classes de uso da terra avaliadas foi de: $17,8 \pm 3,41$ $mg\ kg^{-1}$ na área úmida; $10,4 \pm 1,44$ $mg\ kg^{-1}$ na lavoura e; $4,7$ $mg\ kg^{-1}$ no campo nativo.

Nos pontos de amostragem em área agrícola a concentração de fósforo na camada superficial foi maior para as três formas avaliadas (PT, POT e PD), o que decorre da pouca mobilização do solo, que mantém o adubo residual na profundidade de aplicação. Em profundidade as concentrações obtidas são reflexo da imobilidade do elemento (Bayer e Bertol, 1999) e baixa solubilidade dos compostos de P, sobretudo em solos de natureza ácida e com altos teores de metais, como o alumínio e o ferro. Nas áreas úmidas foram encontradas as maiores concentrações de fósforo. Isso porque, esses locais desaceleram o fluxo de água superficial e permitem o acúmulo de sedimento e do P ligado a ele. Uma vez na zona úmida, o P continuará ligado às partículas do solo ou, complexado na matéria orgânica, a menos que o solo se torne anaeróbico e quimicamente reduzido, nessas condições os óxidos se dissolvem e liberam o PO_4^{3-} .

Os resultados encontrados também ressaltam a influência da topografia na distribuição de C e P. No topo das vertentes há o favorecimento do acúmulo de matéria orgânica e P em comparação à

meia encosta, onde a erosão hídrica remove parcialmente a camada superficial que contém matéria orgânica e nutrientes, dificultando seu acúmulo e a sua humificação. Na base das encostas, devido a diminuição de energia dos fluxos superficiais, parte do material deposita, refletindo nos valores destes atributos nas camadas superficiais. Nas baixadas, grande parte do material perdido via erosão hídrica

das áreas a montante fica retido nas áreas úmidas ribeirinhas. Embora as áreas úmidas funcionem como zonas tampão, este trabalho mostra o grande impacto que a abertura de drenos causa no ciclo biogeoquímico do C e P, como pode ser visualizado nas Figuras 9, 10, 11 e 12 e, pelo erro padrão para a camada 0–5 cm.

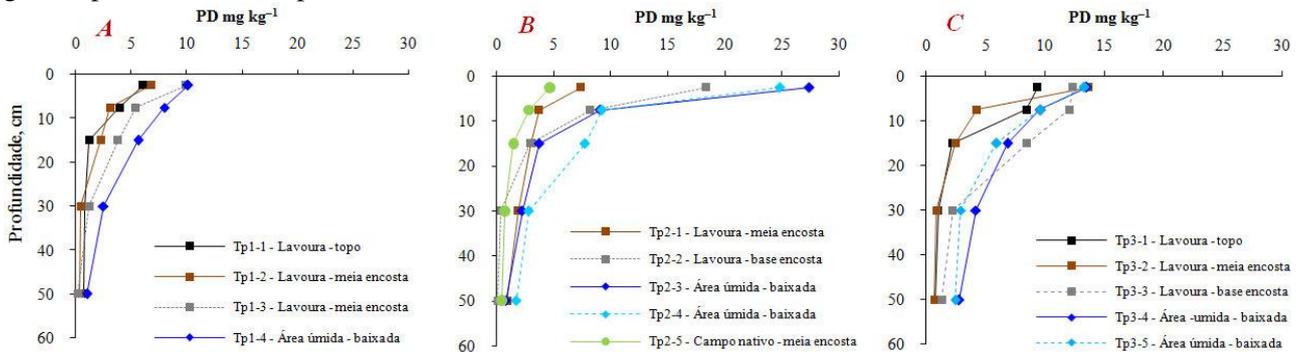


Figura 12. Teores de Fósforo Disponível nas amostras das toposequências 1 (A), 2 (B) e 3 (C).

A densidade média no perfil foi maior nas áreas agrícolas ($1,65 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$), seguida do campo nativo ($1,54 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$) e, área úmida ($1,24 \pm 0,04 \text{ g cm}^{-3}$). Nas áreas agrícolas foi constatada a compactação dos solos na camada 5–20 cm (Tabelas 1, 2 e 3), fato observado também por Pellegrini (2013) e Alvarez (2014) em trabalho desenvolvido na bacia hidrográfica.

O teor médio de argila nos perfis de ambientes aeróbicos foi de $6,5 \pm 0,4\%$ nas lavouras e $5,3 \pm 0,3\%$ no campo nativo, com gradiente de aumento em profundidade em função de alguns pontos ter sido atingido o topo do horizonte Bt (Tabelas 1, 2 e 3). Nas áreas úmidas, a média de argila nos perfis foi de $5,6 \pm 0,3\%$, sendo os maiores valores obtidos na camada superficial (Tabelas 1, 2 e 3), em função da deposição de material.

Nas três toposequências os teores de Fe de maior cristalinidade (Fe_{DCB}) foram obtidos nos perfis amostrados em áreas agrícolas e de campo nativo, ambiente aeróbico bem e moderadamente drenado (Tabelas 2, 3 e 4), com incremento em profundidade nas três toposequências, o que foi atribuído ao aumento nos teores de argila, horizonte Bt. As amostras de solo coletadas em ambiente anaeróbico (Tp1-4, Tp2-3, Tp2-4, Tp3-4 e Tp3-5) apresentaram as menores concentrações de Fe_{DCB} (Tabelas 2, 3 e 4). No ponto de amostragem em área úmida não drenada (Tp2-3) a camada 40–60 cm apresentou teores similares aos encontrados em ambiente aeróbico. Os valores obtidos na camada superficial ressaltam a influência do relevo na exportação de óxidos, o mesmo foi observado em trabalho desenvolvido por Oliveira et al. (1991). Conforme esses autores, os teores de Fe tendem a ser

decrecentes declive abaixo, indicando condições favoráveis à sua exportação.

Para Inda et al. (2014), em ambiente aeróbico, os óxidos de Fe apresentam alta estabilidade e persistem no solo por longos períodos. Entretanto, incrementos no teor de matéria orgânica, aumento da umidade e da atividade microbiana do solo favorecem os principais mecanismos de dissolução e remobilização dos óxidos de Fe no ambiente, o que foi verificado no presente trabalho.

No material transportado de condições oxidantes (Tp1-1, Tp1-2, Tp2-1, Tp2-2, Tp2-5, Tp3-1, Tp3-2 e Tp3-3) para redutoras (Tp1-3, eventualmente, Tp1-4, Tp2-3, Tp2-4, Tp3-4 e Tp3-5), houve uma diminuição significativa na concentração de Fe_{DCB} no solo de todas as camadas avaliadas. Isso resulta da dissolução de tipos cristalinos de óxidos de Fe por reações de redução em microsítios saturados e/ou de complexação, devido ao incremento de matéria orgânica e, da maior umidade e tempo de residência da água no solo que faz com que o Fe^{3+} reduza a Fe^{2+} que é uma forma bem mais solúvel de ferro.

Por outro lado, o incremento significativo de óxidos de Fe amorfos (Fe_o) no solo das áreas úmidas (Tp1-4, Tp2-3, Tp2-4, Tp3-4 e Tp3-5) (Tabelas 2, 3 e 4) está associado à neoformação de tipos metaestáveis, como a ferrihidrita (Kämpf e Schwertmann 1983; Silva Neto et al., 2008). Isso é ressaltado quando é feita a relação $\text{Fe}_o/\text{Fe}_{\text{DCB}}$. Em ambiente aeróbico (Tp1-1, Tp1-2, Tp2-1, Tp2-2, Tp2-5, Tp3-1, Tp3-2 e Tp3-3), os teores de Fe_o são baixos se comparados aos de Fe_{DCB} , o que pode ser confirmado pela baixa razão $\text{Fe}_o/\text{Fe}_{\text{DCB}}$ (valor máximo de 0,07, média 0,06 na Tp1; valor máximo de 0,16, média 0,11 na Tp2 e; valor máximo de 0,27,

média 0,16 na Tp3), evidenciando o predomínio de formas mais cristalinas de óxidos de Fe, característica de solos em avançado estágio de intemperismo (Kämpf e Curi, 2000). No Tp1-3 e Tp3-3, ambiente mal drenado, a razão Fe_o/Fe_{DCB} teve valores máximos de 0,33 e 0,27, média 0,23 e 0,24. Nos pontos

amostrados em ambiente muito mal drenado (Tp1-4, Tp2-3, Tp2-4, Tp3-4 e Tp3-5), a razão Fe_o/Fe_{DCB} teve valor máximo de 1,01 e média 0,84, indicando o predomínio de formas amorfas de óxidos de Fe (Tabelas 2, 3 e 4).

Tabela 2. Densidade, percentagem de argila e teores de óxidos de ferro e alumínio de baixa e alta cristalinidade na topossequência 1.

Ponto/Posição/Uso	Prof. cm	Densidade $g\ cm^{-3}$	Argila %	Fe_{DCB}	Fe_o	Fe_o/Fe_{DCB}	Al_{DCB}	Al_o	Al_o/Al_{DCB}
				..... $g\ kg^{-1}$ .....	.....	.....	..... $g\ kg^{-1}$ .....	.....	.....
Tp1-1	0-5	1,57	6,1	7,8	0,6	0,07	2,6	0,7	0,26
	5-10	1,71	6,2	8,8	0,5	0,06	3,2	0,8	0,26
Topo	10-20	1,72	6,4	9,1	0,5	0,06	3,6	1,1	0,30
	20-40	1,69	6,6	8,7	0,5	0,06	3,7	1,1	0,30
Agricultura	40-60	1,58	8,7	11,0	0,6	0,06	4,4	1,4	0,31
	0-5	1,72	6,1	6,2	0,4	0,07	1,8	0,5	0,31
Tp1-2	5-10	1,71	5,2	6,4	0,4	0,06	2,0	0,7	0,34
	10-20	1,67	5,8	8,1	0,4	0,05	2,4	0,8	0,34
Meia encosta	20-40	1,71	6,7	7,9	0,3	0,04	2,3	0,8	0,36
	40-60	1,73	6,2	7,5	0,3	0,04	2,0	0,7	0,35
Tp1-3	0-5	1,58	3,9	5,3	1,0	0,20	1,3	0,5	0,37
	5-10	1,72	4,6	6,2	2,1	0,33	1,8	0,7	0,40
Base encosta	10-20	1,72	6,1	6,8	1,9	0,28	2,4	0,9	0,40
	20-40	1,68	5,3	6,7	1,6	0,24	2,4	1,0	0,41
Agricultura	40-60	1,78	4,8	5,5	0,6	0,11	1,6	0,5	0,33
	0-5	1,11	3,5	3,0	2,9	0,96	0,7	0,9	1,27
Tp1-4	5-10	1,11	2,8	2,1	2,0	0,98	0,6	0,8	1,33
	10-20	1,11	3,3	1,9	1,9	1,00	0,8	1,0	1,38
Área úmida	20-40	1,27	2,8	1,5	1,3	0,85	0,7	1,0	1,33
	40-60	1,27	3,3	1,5	1,4	0,97	0,5	0,7	1,37

As concentrações de Al_{DCB} , assim como as do Fe_{DCB} , foram maiores nos pontos amostrados em ambiente aeróbico (Tp1-1, Tp1-2, Tp1-3, Tp2-1, Tp2-2, Tp2-5, Tp3-1, Tp3-2 e Tp3-3). Houve incremento nos teores em profundidade, correlacionando-se ao aumento nos teores de argila (Horizonte Bt) (Tabelas 2, 3 e 4). As concentrações obtidas nos pontos localizados em área úmida (Tp1-4, Tp2-3, Tp2-4, Tp3-4 e Tp3-5) decaíram, sendo que o decréscimo foi maior no ponto de amostragem na Tp1. Os valores de Al_{DCB} representam, em sua maior parte, o Al contido na estrutura dos óxidos de Fe e pode se inferir que os maiores valores de Al_{DCB} correspondem à maior ocorrência de substituições isomórficas de Fe por Al nas estruturas dos óxidos de Fe (Vendrame et al., 2011). Os menores teores de Al_{DCB} nos pontos amostrados em área úmida decorrem da forte atuação que a matéria orgânica exerce na complexação e/ou, disponibili-

zação de formas de Al na solução do solo, que possibilita a passagem de Al fortemente complexado para formas mais reativas (Pedrotti et al., 2003).

As concentrações de Al_o na Tp1, Tp2 e Tp3 variaram conforme o gradiente da encosta e condições de drenagem. No Tp1-1 houve incremento de Al_o em profundidade, já os perfis Tp1-2 e Tp1-3 apresentaram acréscimo até os 20 cm com posterior decréscimo, sendo que o Tp1-3 na camada 40–60 cm, o decréscimo foi maior em função da oscilação do lençol freático (Tabela 2). Na Tp2 os teores de Al_o nas amostras das lavouras apresentaram incremento em profundidade. No ponto de amostragem em área de campo nativo (Tp2-5), tanto os teores de Fe quanto de Al, apresentaram pequena variação em profundidade, o que atribui-se ao não revolvimento do solo e adição de fertilizantes que contem metais pesados (Camelo et al., 1990; Kiekens, 1995; Nriagu e Pacyna, 1998; Alcarde et al., 2003). Na Tp3, dos pontos amostrados em lavoura, so-

mente o perfil amostrado no topo da coxilha apresentou incremento nas concentrações em profundidade. O Tp3-2 apresentou um acréscimo nas camadas 5–10 e 10–20 cm, com posterior decréscimo (Tabela 4). O ponto localizado na base da encosta apresentou pequena variação, sendo que os teores decresceram até os 20 cm, depois houve um pequeno acréscimo na camada 20–40 cm, e novamente os teores voltaram a cair (Tabela 4).

Nos pontos de amostragem em área úmida (Tp1-4, Tp2-3, Tp2-4, Tp3-4 e Tp3-5), assim como para o Fe_o, houve um incremento nos teores de óxidos de alumínio amorfos. Os maiores teores de Fe e Al amorfos na camada superficial de áreas úmidas estão associados aos maiores teores de C orgânico, pois, conforme Kämpf e Schwertmann (1983)

a fração húmica tem efeito inibidor na cristalização desses óxidos.

A razão Al_o/Al_{DCB} foi baixa nos ambientes bem e moderadamente drenados o que decorre do elevado intemperismo que, em ambientes tropicais e subtropicais promove a cristalização dos óxidos de Fe e Al, resultando em baixa relação entre as formas amorfas e cristalinas. Kämpf et al. (1988) também obtiveram valores de Fe_o/Fe_{DCB} nesta faixa para Latossolos do sul e sudeste brasileiros. Nos pontos de amostragem em área úmida a razão Al_o/Al_{DCB} foi > 1 em todos os pontos e camadas avaliadas, indicando o predomínio de formas mais amorfas de óxidos de Al (Tabelas 2, 3 e 4).

Tabela 3. Densidade, percentagem de argila e teores de óxidos de ferro e alumínio de baixa e alta cristalinidade na topossequência 2.

Ponto/Posição/Usos	Prof. cm	Densidade	Argila	Fe _{DCB}	Fe _o	Fe _o /Fe _{DCB}	Al _{DCB}	Al _o	Al _o /Al _{DCB}
		g cm ⁻³	%	..... g kg ⁻¹ .....	..... g kg ⁻¹ .....	..... g kg ⁻¹ .....	..... g kg ⁻¹ .....	..... g kg ⁻¹	
Tp2-1	0-5	1,44	9,8	14,4	1,1	0,08	2,6	0,9	0,35
	5-10	1,56	10,0	14,1	1,2	0,08	2,6	1,1	0,41
Meia encosta	10-20	1,45	9,2	14,7	1,0	0,07	3,0	1,3	0,44
	20-40	1,41	10,7	16,6	1,2	0,07	3,7	1,8	0,49
Agricultura	40-60	1,38	13,3	19,8	1,3	0,07	4,6	2,2	0,47
	0-5	1,44	6,5	9,5	1,5	0,16	1,8	1,0	0,57
Tp2-2	5-10	1,62	6,3	10,9	1,7	0,16	2,0	1,1	0,55
	10-20	1,67	5,7	11,0	1,6	0,14	2,2	1,2	0,56
Base encosta	20-40	1,66	6,9	13,1	1,6	0,12	2,8	1,5	0,56
	40-60	1,65	10,6	16,7	1,9	0,12	3,3	1,7	0,52
Tp2-3	0-5	1,15	0,8	3,7	3,2	0,87	1,8	2,1	1,19
	5-10	1,15	1,3	1,5	1,2	0,79	1,5	1,9	1,26
Área úmida	10-20	1,15	1,1	1,3	1,0	0,79	1,6	2,0	1,19
	20-40	1,12	1,1	1,7	1,7	1,01	1,5	2,0	1,32
Pecuária	40-60	1,12	0,5	11,3	5,6	0,50	2,0	2,0	1,01
	0-5	0,98	1,5	2,2	1,7	0,74	1,2	1,3	1,06
Tp2-4	5-10	0,98	3,3	1,9	1,5	0,77	1,2	1,3	1,08
	10-20	0,98	1,2	1,4	1,1	0,76	1,2	1,4	1,20
Área úmida	20-40	1,33	1,0	2,0	1,7	0,86	1,0	1,8	1,76
	40-60	1,33	0,7	2,6	1,8	0,67	1,0	1,8	1,79
Pecuária	0-5	1,48	4,5	6,7	0,8	0,12	1,7	0,8	0,47
	5-10	1,58	5,6	7,5	0,8	0,11	1,9	0,9	0,49
Campo nativo	10-20	1,53	6,3	7,7	0,8	0,11	2,0	1,0	0,52
	20-40	1,58	4,9	6,4	0,8	0,12	1,8	0,9	0,48
Pecuária	40-60	1,51	5,3	8,4	0,8	0,09	1,9	0,9	0,47

Os óxidos de Fe e Al de alto grau de cristalinidade representam a principal forma de Fe e Al

nos solos das topossequências. A natureza ácida e as altas concentrações de Fe e Al, podem acelerar a

fixação de P, tornando este nutriente indisponível para as plantas (Valladares et al., 2003). Por isso, para satisfazer as necessidades das culturas, os agricultores teriam que adicionar as doses de P recomendadas, uma vez que, as mesmas levam em conta as perdas de P adsorvidas aos óxidos. Porém

isso não ocorre na bacia hidrográfica como constatarem Capoane et al. (2016b), pois os agricultores usam doses abaixo do recomendado e, para piorar, o baixo pH aumenta a capacidade de sorção de P desses solos, diminuindo a eficiência de uso do fertilizante fosfatado.

Tabela 4. Densidade, percentagem argila e teores de óxidos de ferro de baixa e alta cristalinidade na topossequência 3.

Ponto/Posição/Uso	Prof. cm	Densidade g cm ⁻³	Argila %	Fe _{DCB}	Fe _o	Fe _o /	Al _{DCB}	Al _o	Al _o /
				..... g kg ⁻¹ .....	.....	Fe _{DCB}	..... g kg ⁻¹ .....	.....	Al _{DCB}
Tp3-1	0-5	1,82	5,9	8,6	0,9	0,11	1,1	0,8	0,68
	5-10	1,79	6,1	10,3	1,0	0,10	1,3	0,9	0,71
Topo	10-20	1,80	7,6	12,2	1,0	0,08	1,6	1,3	0,79
	20-40	1,67	12,1	17,6	1,1	0,06	2,3	1,6	0,70
Agricultura	40-60	1,68	10,6	17,6	1,1	0,06	2,2	1,5	0,70
	<hr/>								
Tp3-2	0-5	1,58	5,0	6,1	0,9	0,15	0,8	0,6	0,73
	5-10	1,69	4,7	7,9	1,2	0,15	1,1	0,7	0,66
Meia encosta	10-20	1,66	4,5	6,6	1,2	0,18	1,1	0,7	0,66
	20-40	1,63	3,6	5,8	1,5	0,26	0,8	0,5	0,68
Agricultura	40-60	1,69	5,3	7,4	0,7	0,10	1,0	0,6	0,64
	<hr/>								
Tp3-3	0-5	1,53	3,6	6,6	1,6	0,25	0,8	0,5	0,59
	5-10	1,71	2,7	3,7	1,0	0,27	0,6	0,3	0,54
Base encosta	10-20	1,71	2,1	4,2	0,9	0,21	0,6	0,3	0,53
	20-40	1,67	6,2	7,4	1,6	0,22	1,2	0,5	0,46
Agricultura	40-60	1,73	3,9	5,8	1,4	0,25	1,0	0,4	0,44
	<hr/>								
Tp3-4	0-5	1,43	7,3	11,3	8,5	0,75	1,6	1,8	1,08
	5-10	1,43	5,8	3,9	3,8	0,96	1,1	1,2	1,15
Área úmida	10-20	1,43	5,8	2,0	1,7	0,84	1,0	1,1	1,15
	20-40	1,63	5,6	2,1	1,8	0,85	1,0	1,1	1,07
Pousio	40-60	1,63	5,8	2,3	2,1	0,93	0,7	1,0	1,36
	<hr/>								
Tp3-5	0-5	1,17	7,0	9,5	8,0	0,84	2,0	2,3	1,11
	5-10	1,17	5,6	4,5	3,9	0,86	1,4	1,6	1,16
Área úmida	10-20	1,17	5,4	2,0	1,4	0,70	1,2	1,2	1,04
	20-40	1,50	5,6	1,7	1,5	0,91	0,9	1,2	1,25
Pousio	40-60	1,50	5,4	2,4	1,8	0,75	0,8	0,9	1,16

As variações na topografia e o uso da terra podem alterar sincrônicamente múltiplos processos do solo, como a erosão e deposição, teor de matéria orgânica e nutrientes, a agregação do solo e o acúmulo e decomposição da matéria orgânica no solo (Lal, 2005, Tang et al., 2010; Saglam e Dengiz, 2012).

Neste trabalho, ficou evidente que os atributos P e C são fortemente afetados pelo relevo, diferindo nas posições de declive e, pelas atividades antrópicas como o uso e manejo do solo. Também, é evidente que as propriedades do solo variam em

curtas distâncias, e isso deve ser considerado na tomada de decisão para a gestão do solo, como a seleção da dose apropriada de fertilizante, os métodos e a frequência de aplicação e, a melhoria da drenagem do solo.

Conclusão

Ao longo das topossequências os teores de C e P (total, orgânico e disponível), em ordem decrescente, foram > na baixada > base da encosta > topo > meia encosta. Considerando as classes de uso da terra, os maiores teores de carbono e fósforo

foram obtidos na área úmida, seguido da lavoura e campo nativo. Esses resultados demonstram que o movimento de sedimentos em superfície e através do perfil do solo é controlado pela posição, forma e declividade da encosta e, estes fatores podem ser utilizados para explicar a variação de algumas propriedades do solo. As várias formas de uso da terra, a aplicação de fertilizantes e, as práticas de manejo utilizadas pelos agricultores também contribuíram substancialmente para a variação nas propriedades do solo.

A condição hidromórfica do solo ao longo das topossequências desempenhou um papel importante na disponibilidade de fósforo, acúmulo de matéria orgânica (COT) e solubilização de óxidos de ferro e alumínio.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo recurso financeiro através do Edital MCT/CNPq/CT-AGRONEGÓCIO/CT-HIDRO. Aos bolsistas de Iniciação Científica do Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFSM pelo apoio nos trabalhos de campo e laboratório.

Referências

- Ahuja, L.R., Ma, L., Howell, T.A., 2002. Agricultural systems models in field research and technology transfer, 1 ed. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Ajami, M., Heidari, A., Khormali, F., Gorji, M., Ayoubi, S., 2016. Environmental factors controlling soil organic carbon storage in loess soils of a subhumid region, northern Iran. *Geoderma* [online] 281. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.017>. Acesso: 16 maio 2017.
- Alcarde, J.C., Rodella, A.A., 2003. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos, in: Curi, N., Marques, J.J., Guilherme, L.R.G., Lima, J.M., Lopes, A.S., Alvarez Venegas, V.H. (Org.), *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 3, pp. 291-334.
- Alloway, B.J., 1990. *Heavy metals in soils*. 1 ed, John Wiley, New York.
- Alvarez, J.W.R., 2014. Transferência de fósforo em pequenas hidrográficas com predomínio de sistema plantio direto precário. Tese (Doutorado). Santa Maria, UFSM.
- Bayer, C., Bertol, I., 1999. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23, 687-694.
- Bernoux, M., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Siqueira Neto, M., Metay, A., Perrin, A.S., Scopel, E., Razafimbelo, T., Blavet, D., Piccolo, M.C., Pavei, M., Milne, E., 2006. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development* 26, 1-8.
- Boix-Fayos, C., Vente, J., Albaladejo, J., Martínez-Mena, M., 2009. Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems. *Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems* [online] 133. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.013>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Braga, F.V.A., Reichert, J.M., Mentges, M.I., Vogelmann, E.S., Padrón, R.A.R., 2015. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência argissolo-gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39, 1025-1035.
- Brubaker, S.C., Jones, A.J., Lewis, D.T., Frank, K., 1993. Soil properties associated with landscape positions. *Soil Science Society of America Journal* 57, 235-239.
- Bruun, T.B., Elberling, B., Neergaard, A., Magid, J., 2015. Organic Carbon Dynamics in Different Soil Types After Conversion of Forest to Agriculture. *Land Degradation & Development* [online] 26. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2205>. Acesso: 16 maio 2017.
- Camelo, L.G.L., Miguez, S.R., Marbán, L., 1990. Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *The Science of the Total Environment* [online] 204. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00187-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00187-3). Acesso: 15 maio 2017.
- Canellas, L.P., Berner, P.G., Silva, S.G., Silva, M.B., Santos, G.A., 2000. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 35, 133-143.
- Capoane, V., Santos, D.R., Kuplich, T.M., 2016a. Efeito do uso da terra e relevo na distribuição espacial e vertical de carbono do solo em uma bacia hidrográfica agrícola. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 9. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20160112>. Acesso: 23 jan. 2017.
- Capoane, V., Krolow, I.R.C., Santos, D.R., Santos, L.C.; Troian, A., 2016b. Distribuição espacial do fósforo disponível do solo em uma bacia hidrográfica agrícola e sua relação com os fatores ambientais uso da terra e declividade. *Revista*

- Brasileira de Geomorfologia [online] 17. Disponível: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i4.976>. Acesso: 23 fev. 2017.
- Capoane, V., Santos, L.J.C., Santos, D.R., Tiecher, T., 2015. Uso de atributos topográficos para predição de áreas propensas a perda e a deposição de sedimento em uma bacia hidrográfica do planalto do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia* [online] 16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i4.976>. Acesso: 05 fev. 2017.
- Costa, F.S., Bayer, C., Zanatta, J.A., Mielniczuk, J., 2008. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 32. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100030>. Acesso: 23 jan. 2017.
- Costa, C., Papatheodorou, E.M., Monokrousos, N., Stamou, G.P., 2013. Spatial variability of soil organic C, inorganic N and extractable P in a Mediterranean grazed area. *Land Degradation & Development* [online] 26. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2188>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Costa, E.M., Silva, H.F., Ribeiro, P.R.A., 2013. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. *Enciclopédia Biosfera* 9, 1842-1860.
- Dessalegn, D., Beyene, S., Ram, N., Walley, F., Gala, T. S., 2014. Effects of topography and land use on soil characteristics along the toposequence of Ele watershed in southern Ethiopia. *Catena* [online] 115. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.007>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Dunne, E.J., Reddy, K.R., 2005. Phosphorus biogeochemistry of wetlands in agricultural watersheds. in: Dunne, E.J., Reddy, K.R.; Carton, O.T. (Org.), *Nutrient Management in Agricultural Watersheds: A Wetland Solution*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp. 105-119.
- Ebeling, A.G., Anjos, L.H.C., Perez, D.V.; Pereira, M.G., Valladares G.S., 2008. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia* [online] 67. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052008000200019>. Acesso: 15 jan. 2017.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro.
- Faria, A.F.G, Santos, A.C., Santos, T.M., Batistella Filho, F., 2010. Influência do manejo do solo nas propriedades químicas e físicas em toposequência na bacia do rio Araguaia, estado do Tocantins. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 34. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200025>. Acesso: 15 mar. 2017.
- Ferreira, R.P., Moreira, A., Rassini, J.B., 2006. Toxicidade de alumínio em culturas anuais. 1 ed. Embrapa Pecuária Sudeste, Série Documentos, São Carlos.
- Guppy, C.N., Menzies, N.W., Moody, P.W., Blamey, F.P.C., 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Australian Journal of Soil Research* [online] 43. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1071/SR04049>. Acesso: 15 mar. 2017.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C., 2005. *Análise multivariada de dados*, 5 ed. Editora Bookman, Porto Alegre.
- Hammer, O., Harper, D.A, Ryan, P.D., 2013. PAST - Paleontological Statistics versão 1.12. Disponível: <http://www.folk.uio.no/ohammer/past>. Acesso: 10 fev. 2017.
- Hattar, B.I., Taimeh, A.Y., Ziadat, F.M., 2010. Variation in soil chemical properties along toposequences in an arid region of the Levant. *Catena* [online] 83. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.07.002>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Hooijer, A., Page, S., Canadell, J.G., Silvius, M. Kwadijk, J., Wösten, H., Jauhiainen, J., 2010. Current and future CO2 emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences* [online] 7. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010>. Acesso: 15 maio 2017.
- Hooijer, A., Page, S., Jauhiainen, J., Lee, W.A., Lu, X.X., Idris, A., Anshari, G., 2012. Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands. *Biogeosciences* [online] 9. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5194/bg-9-1053-2012>. Acesso: 15 maio 2017.
- Inda, A.V., Tomasi, C.A., Oliveira, J.S., Fink, J.R., 2014. Óxidos de ferro e área superficial de Latossolo subtropical sob campo e floresta nativa. *Ciência Rural* 44, 289-292.
- Jackson, M.L., Lim, C.H., Zelazny, L.W., 1986. Oxides, hydroxides, and aluminosilicates. in: Klute, A. (Org.), *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, pp. 101-150.
- Jenny, H., 1941. *Factors of Soil Formation*, 1 ed, McGraw-Hill, New York.

- Lal, R., 2005. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil & Tillage Research* [online] 81. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.002>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 1992. Trace element in plants and soils, 3 ed. CRC Press, Boca Raton.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L., 1996. *Treatment Wetlands*, 2 ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Kämpf, N., Curi, N., 2000. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos. in: Novais, R.F. (Org.), *Tópicos em ciência do solo*. 1 ed. Sociedade Brasileira Ciência do Solo, Viçosa, pp.107-138.
- Kämpf, N., Resende, M., Curi, N., 1998. Iron oxides in Brazilian Oxisols. in: XVIII International Soil Classification Workshop: Classification, Characterization and Utilization of Oxisols, Rio de Janeiro.
- Kämpf, N., Schwertmann, U., 1983. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. *Geoderma* [online] 29. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(83\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(83)90028-9). Acesso: 15 mar. 2017.
- Kiekens, L.Z., 1995. Heavy metals in soils, in: Alloway, B.J. (Org.), *Blackie Academic & Professional*, Glasgow, pp. 261-277.
- Krasilnikov, P.V., García Calderón, N.E., Sedov, S.N., Vallejo Gómez, E., Ramos Belloa, R., 2005. The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, Mexico. *Catena* [online] 62. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2005.02.003>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Kværnø, S.H., Haugen, L.E., Børresen, T., 2007. Variability in topsoil texture and carbon content within soil map units and its implications in predicting soil water content for optimum workability. *Soil and Tillage Research* [online] 95. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.02.001>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Lal, R., 1988. Monitoring soil erosion's impact on crop productivity. In: Lal, R. (Org.), *Soil Erosion Research Methods*. CRC Press Book, Ankeny, pp. 187-200.
- Liu, X., Zhang, W., Zhang, M., Ficklin, D.L., Wang, F., 2009. Spatio-temporal variations of soil nutrients influenced by an altered land tenure system in China. *Geoderma* [online] 152. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.022>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Liu, X.L., He, Y.Q., Zhang, H.L., Schroder, J.K., Li, C.L., Zhou, J., Zhang, Z.Y., 2010. Impact of land use and soil fertility on distributions of soil aggregate fractions and some nutrients. *Pedosphere* [online] 20. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60056-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60056-2). Acesso: 25 mar. 2017.
- McKeague, J.A., Day, J.H., 1966. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Canadian Journal of Soil Science* 46, 13-22.
- McKenzie, N.J., Ryan, P.J., 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* [online] 89. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00137-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00137-2). Acesso: 25 mar. 2017.
- Mehra, J.P., Jackson, M.L., 1960. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* [online] 7. Disponível: <https://doi.org/10.1346/CCMN.1958.0070122>. Acesso: 25 mar. 2017.
- Menegotto, E., Sartori, P.L.P., Maciel Filho, C.L., 1968. Nova sequência sedimentar sobre a Serra Geral no Rio Grande do Sul. *Publicação Especial do Instituto de Solos e Culturas, Seção Geologia e Mineralogia*, Santa Maria 1, 1-19.
- Menezes, F.P., 2008. Substâncias húmicas em solos de diferentes feições geomorfológicas no rebordo do planalto do Rio Grande do Sul. *Dissertação (Mestrado)*. Santa Maria, UFSM.
- Miller, P.M., Singer, M.J., Nielsen, D.R., 1988. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society of America Journal* [online] 52. Disponível: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200040045x>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., 1993. *Wetlands*, 2 ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Moore, I.D.; Grayson, R.B.; Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modeling - a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Process* [online] 5. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360050103>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A., Peterson, G.A., 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal* 57, 443-452.
- Muggler, C.C., Pape, T., Buurman, P., 1997. Laser grain-size determination in soil genetic studies. 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian Oxisols. *Soil Science* 162, 219-228.
- Murphy, J.; Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31-36.

- Mulla, D.J.; Mcbratney, A.B., 2000. Soil spatial variability. Sumner, M.E. (Org.), Handbook of Soil Science, CRC Press, Boca Raton, pp. A321–A352I.D.
- Mulugeta, L., Sheleme, B., 2010. Characterization and classification of soils along the toposequence of Kindo Koye Watershed in Southern Ethiopia. East African Journal of Sciences [online] 4. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4314/eajsci.v4i2.71528>. Acesso: 15 maio 2017.
- Nriagu, J.O., Pacyna, J.M., 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals. Nature [online] 333. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1038/333134a0>. Acesso: 15 maio 2017.
- Oades, J.M., 1978. Mucilages at the root surface. European Journal of Soil Science [online] 29. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1978.tb02025.x>. Acesso: 15 maio 2017.
- Oliveira, J.B., Rezende, M., Curi, N., 1991. Caracterização e classificação de Latossolos variaçõ una e de solos afins da região de Guaíra, SP. Revista Brasileira de Ciência do Solo 15, 207-18.
- Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. Methods of Soil Analysis, Part 2. in: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, Q.R. (Org.), Chemical and Microbiological Properties. 1 ed. Soil Science Society of America. Madison, pp. 403-430.
- Patzold, S., Mertens, F.M., Bornemann, L., Koleczek, B., Franke, J., Feilhauer, H., Welp, G., 2008. Soil heterogeneity at the field scale: a challenge for precision crop protection. Precision Agriculture [online] 9. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-008-9077-x>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Pedrotti, A., Ferreira, M.M., Curi, N.; Silva, M.L.N.; Lima, J.M., Carvalho, R., 2003. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo [online] 27. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000100001>. Acesso: 15 fev. 2017.
- Pellegrini, A., 2013. Índices de desempenho ambiental e comportamento hidrossedimentológico em duas bacias hidrográficas rurais. Tese (Doutorado). Santa Maria, UFSM.
- Reddy, K.R., O'connor, G.A., Gale, P.M., 1998. Phosphorus sorption capacities of wetland soils and stream sediments impacted by dairy effluent. Journal of Environmental Quality [online] 27. Disponível: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020027x>. Acesso: 01 mar. 2017.
- Rheinheimer, D.S., Bispo Jr, J., Petry, C., Kaminski, J., 1992. Alterações do sistema radicular e na concentração de fosforo em tremoço azul provocadas pelo alumínio. Ciência Rural 22, 11-14.
- Rheinheimer, D.S., Cassol, P.C.; Kaminski, J., Anghinoni, I., 2008. Fósforo orgânico do solo. in: Santos, G.A., Camargo, F.A.O. (Org.), Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais. 2 ed. Metrópole, Porto Alegre, pp. 139-157.
- Ritchie, J.C., McCarty, G.W., Venteris, E.R., Kaspar, T.C., 2007. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. Geomorphology [online] 89. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.021>. Acesso: 15 maio 2017.
- Rossato, M.S., 2011. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. Tese (Doutorado em Geografia). Porto Alegre, UFRGS.
- Rumpel, C., Kögel-Knabner, I., 2011. Deep soil organic matter- a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. Plant and Soil [online] 338. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>. Acesso: 15 maio 2017.
- Saglam, M., Dengiz, O., 2012. Influence of selected land use types and soil texture interactions on some soil physical characteristics in an alluvial land. International Journal of Plant Production 3, 508-513.
- Santos, A.C., 2004. Fertilidade do solo e redistribuição de ¹³⁷Cs em função da cobertura vegetal, relevo, e classes texturais, em uma microbacia hidrográfica do Estado da Paraíba. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.
- Schwanghart, W., Jarmer, T., 2011. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography — a case study from south-eastern Spain. Geomorphology [online] 126. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.008>. Acesso: 15 maio 2017.
- Schwertmann, U. Taylor, R.M., 1989. Iron oxides. in: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Org.), Minerals in soil environments. Madison: Soil Science Society of America, pp. 379-438.
- Seeber, J., Scheu, S., Meyer, E., 2006. Effects of macrodecomposers on litter decomposition and soil properties in alpine pastureland: a mesocosm experiment. Applied Soil Ecology [online] 34. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.02.004>. Acesso: 15 maio 2017.
- Silva Neto, L.F., Inda, A.V., Bayer, C., Dick, D.P., Tonin, A.T., 2008. Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. Brasileira de Ciência do Solo 32, 1873-1881.

- Six, J., Paustian, K., Elliot, E., Combrink, C., 2000. Soil structure and organic matter: distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal* [online] 64. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0084988>. Acesso: 15 maio 2017.
- Takata, Y., Funakawa, S., Akshalov, K., Ishida, N., Kosaki, T., 2007. Spatial prediction of soil organic matter in northern Kazakhstan based on topographic and vegetation information. *Soil Science and Plant Nutrition* 53, 289-299.
- Tang, X., Liu, S., Liu, J., Zhou, G., 2010. Effects of vegetation restoration and slope positions on soil aggregation and soil carbon accumulation on heavily eroded tropical land of southern China. *Journal of Soils and Sediments* [online] 10. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s11368-009-0122-9>. Acesso: 01 mar. 2017.
- Tedesco, M.J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H., Volkweiss, S.J., 1995. Análises de solos, plantas e outros materiais. *Boletim técnico* 5, 2 ed. UFRGS, Porto Alegre.
- Uhde, L.T., 2009. Sistema pedológico em um ambiente antropizado da depressão central do RS. Tese (Doutorado). Santa Maria, UFSM.
- Umali, B.P., Oliver, D.P., Forrester, S., Chittleborough, D. J., Hutson, J. L., Kookana, R. S., Ostendorf, B., 2012. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard. *Catena* [online] 93. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.010>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Valladares, G.S., Pereira, M.G., Anjos, L.H.C., 2003. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. *Bragantia* [online] 62. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052003000100014>. Acesso: 01 fev. 2017.
- Vendrame, P.R.S., Eberhardt, D.N., Brito, O. R., Marchão, R.L., Quantin, C., Becquer, T., 2011. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado. *Semina: Ciências Agrárias* [online] 32. Disponível: [http://dx.doi.org/10.5433/1981-3181\(2011\)32\(1\)00000](http://dx.doi.org/10.5433/1981-3181(2011)32(1)00000). Acesso: 15 fev. 2017.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.
- Wang, Y., Fu, B., Lü, Y., Chen, L., 2011. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena* [online] 85. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.003>. Acesso: 15 maio 2017.
- Wang, J., Fu, B., Qiu, Y., Chen, L., 2001. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in semi-arid small catchment of the loess plateau in China. *Journal of Arid Environments* [online] 48. Disponível: <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0763>. Acesso: 15 maio 2017.
- Young, F.J., Hammer, R.D., 2000. Soil-landform relationships on a loess-mantled, upland landscape in Missouri. *Soil Science Society of America Inc.* [online] 64, 1443-1454. Disponível: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.6441443x>. Acesso: 17 mar. 2017.
- Zamuner, E.C.; Picone, L.I., Echeverria, H.E., 2008. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil & Tillage Research* [online] 99. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.12.006>. Acesso: 01 mar. 2017.
- Zhu, H., Wuc, J., Guoa, S., Huangc, D., Zhuc, Q., Gec, T., Leia, T., 2014. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau. *Catena* [online] 120. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.007>. Acesso: 17 mar. 2017.