

Comissão 1.2 - Levantamento e classificação do solo

AGRUPAMENTO DE PEDONS DE CAMBISSOLOS HÚMICOS COM BASE EM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS UTILIZANDO A ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

Pablo Grahl dos Santos⁽¹⁾, Ildegardis Bertol^{(2)*}, David José Miquelluti⁽²⁾, Jaime Antônio Almeida⁽²⁾ e Álvaro Luiz Mafra⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, Santa Catarina, Brasil.

⁽²⁾ Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Solos, Lages, Santa Catarina, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: ildegardis.bertol@udesc.br

RESUMO

Em um levantamento pedológico, a descrição detalhada do conjunto de atributos do solo é fundamental para se analisar e compreender as interações dos diversos processos que ocorrem no solo. Para tanto, a análise multivariada pode ser uma ferramenta estatística importante para interpretar e compreender melhor as relações e semelhanças entre pedons. Os objetivos deste trabalho foram diferenciar e agrupar pedons similares com base em atributos físicos e químicos usando a estatística multivariada. O estudo foi desenvolvido em Lages, SC, a 27° 48' de latitude sul e 50° 20' de longitude oeste, com 916 m de altitude média e clima mesotérmico úmido com verões frescos (Cfb). Sete pedons de Cambissolos desenvolvidos de siltito foram descritos e coletados em um levantamento detalhado de solos para o planejamento conservacionista com base na capacidade de uso das terras. Os atributos químicos e físicos analisados foram textura, densidade, porosidade, estabilidade de agregados em água, teores de carbono orgânico, P, Al, K, Na, Ca, Mg e acidez ativa e potencial. As variáveis de solo foram avaliadas por meio da análise de fatores e agrupamentos. A partir dessas análises, foi possível agrupar os pedons com base em seus atributos químicos e físicos e identificar aqueles que foram determinantes na discriminação dos pedons. Além disso, levou a uma melhor compreensão da natureza intrínseca de correlações entre os atributos físicos e químicos do solo, demonstrando que a análise multivariada é uma ferramenta eficaz no estabelecimento dos agrupamentos de solos.

Palavras-chave: atributos do solo, análise de agrupamentos, análise de fatores.

Recebido para publicação em 3 de julho de 2013 e aprovado em 11 de dezembro de 2014.

DOI: 10.1590/01000683rbc20130415

ABSTRACT: GROUPS OF INCEPTISOL PEDONS BASED ON CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES APPLYING MULTIVARIATE STATISTICS

In a soil survey, a detailed description of a set of soil properties is important for analyzing and understanding the interactions of several soil forming processes. Thus, multivariate analysis may be an important statistical tool to better interpret and understand the relationships and similarities between pedons. The aim of this study was to differentiate and group similar pedons based on physical and chemical properties using multivariate statistics. The study was carried out in Lages, SC, Brazil, at 27° 48' S latitude and 50° 20' W longitude, with an average altitude of 916 m and a humid mesothermal climate. Seven Inceptisol pedons developed from siltstones were described and collected in a detailed soil survey for conservation planning, based on land use capability. The chemical and physical properties analyzed were particle size, bulk density, porosity, aggregate stability in water, organic carbon content, P, Al, K, Na, Ca, Mg, and active and potential acidity. Soil variables were evaluated using factor and cluster analysis. From these analyses, it was possible to group the pedons based on their chemical and physical properties and identify which of them were determinant in discriminating these profiles. Thus, it was possible to better understand the intrinsic nature of correlations between physical and chemical soil properties, demonstrating that multivariate analysis is an effective tool in establishing these soil groups.

Keywords: soil properties, cluster analysis, factor analysis.

INTRODUÇÃO

O levantamento pedológico visa separar áreas de modo que a maioria dos pedons seja similar (polipedons) dentro de cada área e diferentes de uma área para a outra. Normalmente, esse processo é empírico e não codificado, dependente de um conhecimento “tácito”, previamente adquirido pela mente do pedólogo. A identificação dos limites entre conjuntos de pedons similares permite delinear distintas unidades de mapeamento, em que, em levantamentos detalhados, podem corresponder às séries de solo. Isso pode ocorrer quando o conjunto de pedons similares que ocupa um dado espaço geográfico perfizer mais de 70 % dos pedons da superfície mapeada (Legros, 2006).

Uma das maiores dificuldades dos levantamentos detalhados de solos é perceber até onde se estende a continuidade lateral de pedons similares, para que se possam delinear seus limites num mapa, uma vez que não se pode observar, descrever e analisar cada pedon individualmente. Para isso, é fundamental conhecer as relações perfil-superfície do solo; entretanto, depende da experiência de cada pedólogo. A similaridade dos pedons numa determinada área pode ser também avaliada comparando-se um conjunto de atributos contidos em cada pedon, de um conjunto previamente amostrado, podendo-se, para isso, utilizar a técnica da estatística multivariada ou da geoestatística.

O objetivo de um levantamento pedológico é entender a organização espacial dos solos no ambiente natural, a fim de estudá-lo por meio de uma abordagem, que é, ao mesmo tempo, específica e interdisciplinar segundo Legros (2006), o que, por fim, pode gerar conhecimentos para melhor compreender esse recurso natural, utilizando-o para o planejamento sustentável

de uso da terra (IBGE, 2007). Hudson (1992) afirmou que a relação solo-paisagem facilita o processo de levantamento desse recurso, estabelecendo alguns paradigmas sobre o assunto: dentro de uma unidade solo-paisagem ocorre interação entre os cinco fatores de formação em diferentes magnitudes, resultando em diferentes tipos de solos; os solos dentro de uma mesma unidade solo-paisagem são mais similares quando comparados a solos em outras unidades; áreas com as formas do relevo e substrato geológico, semelhantes entre si, também apresentam associação de solos com características similares; áreas adjacentes de diferentes unidades solo-paisagem evidenciam relações espaciais; e uma vez que as quantidades de solos e as unidades de paisagem são determinadas na área, o tipo de solo pode ser inferido pela identificação das unidades solo-paisagem.

Rossiter e Rojas (2000) discutiram os conceitos e métodos em levantamento de solos como um processo de inventário desse recurso, caracterizando-o e apresentando-o de forma simples de entender e interpretar para os inúmeros usuários. De acordo com Legros (2006), atualmente nos levantamentos de solos, existem cinco metodologias que podem ser aplicadas: mapeamento por malha de observações; mapeamento livre ou categórico, em que são utilizados conceitos de relação solo-paisagem; mapeamento utilizando-se análise geoestatística; mapeamento por meio da lógica *fuzzy*; e mapeamento do tipo *land system*. Segundo Silva Júnior et al. (2012), alguns autores ultimamente têm sugerido nova abordagem no mapeamento de solos, ou seja, utilizar concomitantemente métodos determinísticos (similaridade entre pedons, modelos de paisagem) e classificar numericamente (geoestatística e análise multivariada), como proposta na caracterização dos solos e de seus atributos, gerando um levantamento híbrido.

Assim, a análise multivariada, por constituir-se de um conjunto de técnicas estatísticas que trata diversas variáveis de dados simultaneamente (Gerhardt et al., 2001), pode ser alternativa útil para separar unidades de mapeamento com base nas reais diferenças entre pedons. Nesse caso, a estatística é uma ferramenta auxiliar, indicada para averiguar se as unidades de mapeamento foram corretamente delineadas a partir de um modelo conceitual solo-paisagem, verificando se nela predominam pedons similares. A análise multivariada possibilita a classificação antecipada de objetos similares, em grupos, a discriminação dos objetos de acordo com os grupos previamente existentes na população, a investigação das relações de dependência entre as variáveis e a comparação de populações ou validação de suposições por meio de testes de hipóteses (Mingoti, 2005). Entre os tipos de análise multivariada, o de componentes principais é um dos mais utilizados. De acordo com Valladares et al. (2008), a análise de componentes principais (ACP) pode ser empregada para agrupar os perfis de solos com características semelhantes. Na ACP, cada componente principal é formado pela combinação linear das variáveis originais. Quando os dois primeiros componentes conseguem acumular a maior proporção da informação contida no conjunto das variáveis originais, cada perfil de solo pode ser definido pelas duas novas variáveis (componentes principais), possibilitando a sua representação num diagrama. A análise da distribuição dos pontos nesse diagrama permite estudar melhor as relações e semelhanças entre os perfis.

A investigação das relações de dependência e classificação pode ser procedida por meio de análise de fatores (AF) (Silva, 2008). A AF visa descrever a estrutura de dependência de um conjunto de variáveis pela criação de fatores, que supostamente têm aspectos comuns. Trata-se de uma técnica estatística que, a partir da matriz de correlações ou de covariâncias das variáveis originais, permite a criação de um conjunto menor de fatores. Também permite saber o quanto cada fator está associado a cada variável e o quanto o conjunto de fatores explica a variabilidade total dos dados originais (Barroso e Artes, 2003). A ideia básica é que pode ser possível descrever um conjunto de p variáveis X_1, X_2, \dots, X_p em termos de um número menor de índices ou fatores, e no processo obter melhor compreensão do relacionamento dessas variáveis (Manly, 2008).

O estudo das relações de dependência e classificação pode ser feito também por análise de agrupamentos (AG) (Silva, 2008). A AG constitui uma série de procedimentos utilizados na identificação de padrões de comportamento por meio da formação de grupos homogêneos de objetos (Mingoti, 2005). O princípio consiste na ligação dos objetos estudados por seu grau de semelhança, e o objetivo principal é a identificação de grupos que apresentem comportamentos similares. Utiliza, principalmente,

métodos hierárquicos de aglomeração a partir de uma matriz de similaridade entre objetos. O algoritmo inicia reunindo os objetos mais próximos, com maior similaridade, e prossegue até a formação de um único grupo composto por todos os objetos analisados. É representada por um diagrama de árvore (dendrograma), em que menores distâncias entre objetos indicam maior grau de similaridade entre eles (Moita Neto e Moita, 1998).

Vários autores consideram a utilização de métodos estatísticos multivariados uma ferramenta potencial aplicada em levantamentos pedológicos e em estudo de atributos do solo (Webster e Oliver, 1990; Kravchenko et al., 2002), sendo possível prever a ocorrência de pedons similares e delimitar as unidades de mapeamento (Demattê e Garcia, 1999; Demattê e Nanni, 2003).

Com este estudo avaliou-se o potencial de técnicas de análise estatística multivariada para determinar a similaridade entre pedons de Cambissolos Húmicos, com base em seus atributos químicos e físicos.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em uma bacia hidrográfica, situada a 27° 48' de latitude sul e 50° 20' de longitude oeste, com altitude média de 916 m, em Lages, SC, com clima subtropical do tipo mesotérmico úmido com verão fresco (Cfb), de acordo com Köppen, com precipitação pluvial média anual de 1.600 mm. Geologicamente, a área está sobre a formação Rio do Rastro, pertencente ao Grupo Passa-Dois do período Permiano Superior, constituída por rochas de origem sedimentar, principalmente siltitos (White, 1908; Schneider et al., 1974). A área de estudo foi antropizada, tendo um longo histórico de uso e de sistemas de manejo do solo desde a década de 1970, envolvendo vários tipos de preparo do solo, calagem e adubação, com aplicações, por exemplo, de calcário dolomítico, adubos minerais formulados como NPK, superfosfato triplo, fosfato de cálcio e gesso agrícola e com cultivos principalmente de milho, soja, feijão e de forrageiras como trevo, aveia e azevém. Atualmente é cultivada sob o sistema de integração lavoura-pecuária (Figura 1).

O estudo foi desenvolvido em perfis representativos descritos segundo Santos et al. (2012) em um levantamento detalhado do tipo utilitário com vista ao planejamento conservacionista com base na capacidade de uso do solo (Lepsch, 1983; Rossiter e Rojas, 2000). Foram selecionadas, na área, sete sub-bacias hidrográficas elementares (pequena ordem), com área total de 29,8 ha e 2.827 m de perímetro (Figura 1).

O levantamento dos atributos do solo em campo consistiu, inicialmente, de um caminhamento

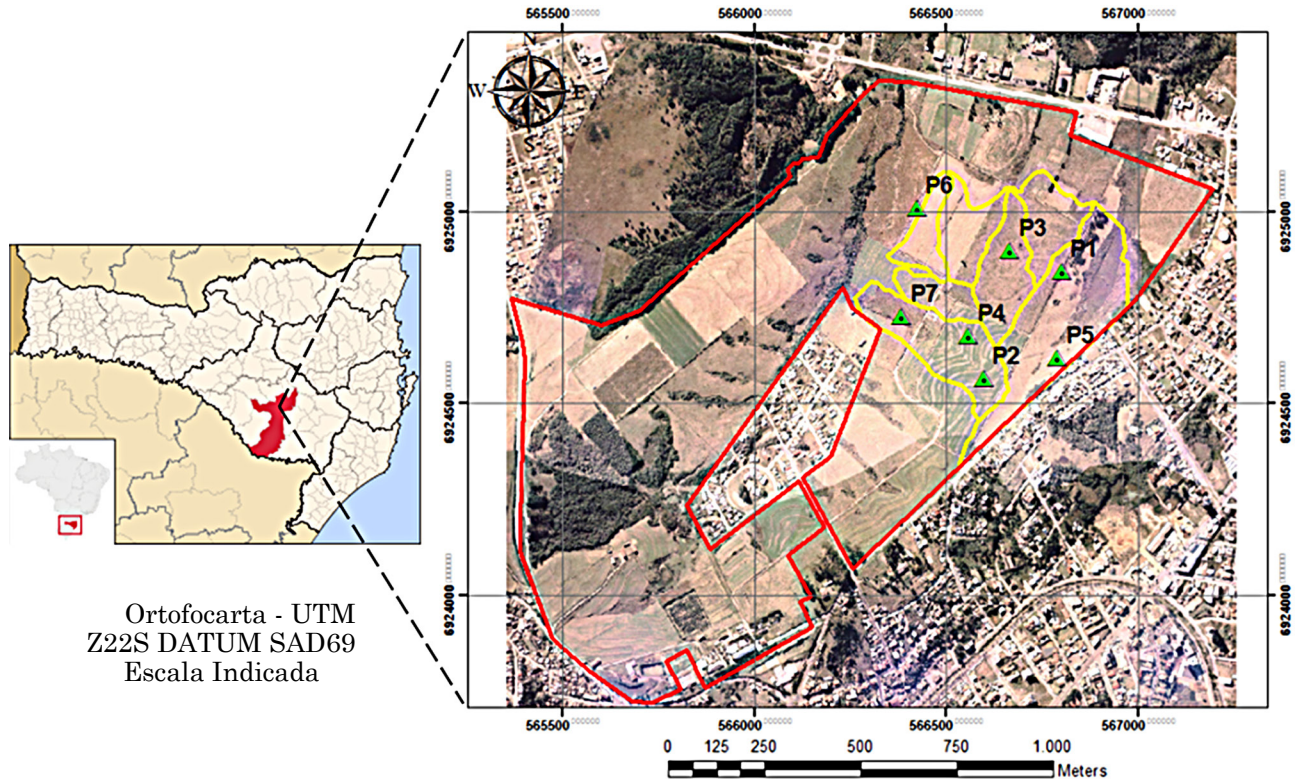


Figura 1. Localização geográfica da área do estudo e dos pedons.

livre para reconhecimento da área, utilizando-se tradagens preliminares e sistemáticas e, a partir disso, juntamente com as informações básicas obtidas por foto-interpretatação, estabeleceram-se os locais de amostragem. Esses locais constituíram-se de barrancos de estrada e de trincheiras abertas com auxílio de retroescavadeira, escolhidos de acordo com o padrão fisiográfico e de toposequência, com a ajuda de fotointerpretação feita com um estereoscópio de espelho. Vários pontos de observação (onde foram efetuadas prospecções com o trado) foram definidos por meio de um sistema de malha, sendo georreferenciados, em uma grade regular de 50 m por 50 m, utilizando um receptor *differential global positioning system* (DGPS), modelo *Raven* e *software Site Mate da Farm Works*. Nesses pontos, foram descritos os atributos do solo com diagnósticos da capacidade de uso do solo (profundidade efetiva, drenagem interna do perfil, declividade, tipo e grau de erosão hídrica).

Após a escolha do local e descrição dos sete perfis mais representativos das unidades de mapeamento, realizou-se a coleta de amostras de solo deformadas e em anéis volumétricos (estrutura indeformada) em cada um dos seus horizontes, para posterior análise física e química dos solos.

As análises químicas foram feitas de acordo com os métodos descritos em Tedesco et al. (1995)

e Embrapa (1997). A acidez ativa (pH em H_2O e KCl $1\ mol\ L^{-1}$ com relação de 1:1) foi determinado pelo método potenciométrico; e o carbono orgânico total, pelo método de Walkley-Black por oxidação com dicromato de potássio em meio ácido e titulometria de complexação com solução de sulfato ferroso. Os teores de P extraível, K e Na trocáveis foram determinados utilizando o extrator Mehlich-1, com leituras em fotômetro de chama para K e Na e em espectrofotômetro para P. O Al trocável foi determinado por titulação de neutralização com $NaOH$ $0,0125\ mol\ L^{-1}$, após extração com KCl $1\ mol\ L^{-1}$. A acidez potencial (H+Al) foi obtida com extrator acetato de cálcio $0,5\ mol\ L^{-1}$ tamponada a pH 7 e titulada com $NaOH$ $0,02\ mol\ L^{-1}$. O cálcio e o magnésio foram extraídos com KCl $1\ mol\ L^{-1}$ e determinados em espectrofotômetro de absorção atômica. A soma de bases, a capacidade de troca de cátions a pH 7, a saturação por bases, por alumínio e por sódio, foram calculadas.

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro simplificado (Bouyoucus, 1962). Já a estabilidade de agregados em água por peneiramento úmido, segundo método descrito por Kemper e Chepil (1965), calculando-se o diâmetro médio geométrico.

As amostras de solo não deformadas foram coletadas em anéis metálicos com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, para determinar a umidade

volumétrica, densidade do solo e porosidade do solo pelo método da mesa tensão de areia, conforme descritos em Embrapa (1997). A partir desses dados, também foram calculados o espaço aéreo e volume de partículas sólidas.

Os pedons foram classificados taxonomicamente no 4º nível categórico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Embrapa, 2013).

Todos os pedons foram classificados na subordem dos Cambissolos Húmicos, mas como ocorreram variações expressivas em vários atributos físicos e químicos desses, apesar de se enquadrarem num mesmo nível categórico do SiBCS, utilizaram-se técnicas estatísticas multivariadas de análise de fatores e análise de agrupamentos que pudessem indicar a pertinência de agrupá-los em níveis diferenciados que poderiam corresponder às séries de solos. Os dados foram padronizados (média zero e variância unitária) para evitar a influência das unidades de medida nas análises. Na análise de agrupamentos, para se medir a similaridade, utilizou-se a distância euclidiana; e para a formação dos grupos, adotou-se o método aglomerativo de Ward. As análises foram realizadas com o programa Statistica 8 (Statsoft, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos foram classificados como Cambissolos Húmicos alíticos (CHal) e alumínicos (CHa); e no 4º nível categórico (subgrupos), houve a ocorrência de CHal lépticos (Pedons 1 e 2), CHal típicos (Pedons 3, 5, 6 e 7) e CHa típico (Pedon 4). Os resultados das análises químicas e físicas para caracterização dos solos, encontram-se nos quadros 1 e 2. A descrição geral e a morfológica dos perfis desses solos podem ser consultadas em Santos (2010).

Caracterização e classificação dos pedons

Os Cambissolos Húmicos alíticos foram enquadrados no subgrupo dos lépticos (P1 e P2) por apresentarem contato lítico entre 50 e 100 cm da superfície do solo (Embrapa, 2013). No horizonte mais superficial, esses solos apresentaram teor médio de carbono orgânico (CO) de 24,9 g kg⁻¹, no P1 e de 22 g kg⁻¹, no P2. A espessura do horizonte A no P1 foi maior do que 25 cm (Ap1+Ap2+AB= 45 cm) e solum maior do que 75 cm (A+B = 80 cm); no P2, de 62 cm, com profundidade do solum de 90 cm. A cor úmida do horizonte A, nos dois pedons, apresentou valor/croma menor ou igual a três e matizes 10YR e cor seca com valor menor ou igual a cinco. O desenvolvimento dos agregados da estrutura do solo foi estimado como fraco a moderado, sendo do tipo granular e em blocos angulares e subangulares de tamanho médio a pequeno no P1; e em blocos

angulares e, ou, subangulares moderados a fortes, de tamanho médio e grande no P2. A saturação por bases foi inferior a 65 % no P1 e excepcionalmente alta, de 66 %, no P2, por ter sofrido calagem prévia.

No horizonte subsuperficial, o P1 apresentou argila de atividade alta (maior do que 27 cmol_c kg⁻¹); e P2 variou de 21,9 a 27,4 cmol_c kg⁻¹, saturação por bases inferior a 50 % e Al maior do que 4 cmol_c kg⁻¹ nos dois pedons, caracterizando caráter alítico. A cor do solo dominante no horizonte B do P1 foi a bruno-escura (7,5-10YR3/3); e no P2 variou de bruno-escura, bruno (10YR4/3) a vermelho-amarelada (5YR5/6). O teor de Fe do solo foi menor que 80 g kg⁻¹ (hipoférrico). Não se identificou a presença de superfícies de fricção (slickensides) ou cerosidade.

Os pedons P3 (Cambissolo Húmico alítico típico) e P4 (Cambissolo Húmico alumínico típico) apresentaram horizonte B incipiente com algumas características morfológicas similares às do B latossólico, porém com espessura ou uma ou mais características físicas, químicas ou mineralógicas que não atendem aos requisitos para B latossólico, dentro de 150 cm da superfície do solo, segundo Embrapa (2013). Esses solos no horizonte superficial apresentaram agregados estruturais com grau de desenvolvimento fraco/moderado; e consistência, quando seco, dura a muito dura e extremamente dura. Os teores médios de CO no horizonte A variaram de 19 g kg⁻¹, no P3, a 17,5 g kg⁻¹, no P4.

A relação textural do P3 e P4 foi de 1,1. Os pedons apresentaram argila de atividade alta no horizonte BA e argila de atividade baixa, mas superior a 20 cmol_c kg⁻¹, no Bi do P3, e inferior a 20 cmol_c kg⁻¹ no Bi e BC do P4, com saturação por bases menor que 50 % (distrófico) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B em ambos. No horizonte B, a cor dominante (úmida) do solo no P3 foi a bruno-escura a bruno-avermelhada (6,5YR4/4); já no P4 variou de bruno-amarelado escura (10YR4/4) a bruno-forte (7,5YR5/6). Em razão da alta concentração de Al trocável decorrente do baixo pH (elevada acidez), da baixa saturação por bases e da alta saturação por Al, bem como da atividade da fração argila, apresentaram-se caráter alítico no horizonte Bi do P3 e alumínico no Bi do P4. O teor de Fe₂O₃ foi inferior a 80 g kg⁻¹.

Os pedons 5, 6 e 7 (Cambissolos Húmicos alíticos típicos) evidenciaram variação quanto ao teor de CO no horizonte superficial, com apenas 17,9 g kg⁻¹ de CO no P5, seguido de 22,2 g kg⁻¹ no P6 e 18,9 g kg⁻¹ no P7. Em relação à espessura do horizonte A, o P5 apresentou de 70-75 cm e profundidade do solum de 90-98 cm; o P6 apresentou 50 cm de espessura no A e de 98-103 cm de profundidade total, enquanto o P7 demonstrou 81 cm de espessura e profundidade de 135 cm. O solo em todos os pedons apresentou cor seca com valor menor ou igual a cinco, mas não evidenciou cor úmida com valor/croma menor ou igual a três, em todos os horizontes. A saturação por

Quadro 1. Atributos químicos do solo nos horizontes (Hor) A e B dos pedons estudados

Hor	pH		C org	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	P	H+Al	S	T	V	m	Na
	H ₂ O	KCl													
Ordem	1:1		dag kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			%			
P1 – Cambissolo Húmico alítico léptico															
Ap1	4,51	3,71	3,30	8,38	7,12	0,32	0,04	3,99	9,39	10,77	15,86	26,63	59,55	20,09	0,16
Ap2	4,65	3,73	2,34	1,47	1,64	0,09	0,05	4,88	4,88	10,29	3,25	13,53	23,99	60,04	0,34
AB	4,87	3,75	1,83	1,37	1,44	0,07	0,06	5,12	2,06	9,98	2,93	12,92	22,71	63,56	0,47
BA	4,98	3,76	1,48	1,34	1,33	0,06	0,05	5,18	1,69	11,31	2,78	14,09	19,71	65,09	0,34
Bi	4,96	3,74	1,23	1,29	1,61	0,07	0,03	5,47	1,12	10,20	3,00	13,20	22,73	64,60	0,23
BC	4,99	3,73	1,03	1,21	1,81	0,07	0,03	6,13	2,44	9,36	3,12	12,48	25,02	66,24	0,24
P2 – Cambissolo Húmico alítico léptico															
Ap1	5,20	4,25	3,09	15,50	6,10	0,07	0,04	1,19	13,89	7,71	21,71	29,42	73,78	5,20	0,13
Ap2	5,09	3,89	2,06	12,63	5,34	0,05	0,03	4,88	1,50	10,08	18,05	28,13	64,16	21,28	0,10
AB	5,13	3,84	1,46	10,13	4,62	0,03	0,03	6,84	0,75	10,08	14,81	24,89	59,51	31,59	0,14
BA	5,13	3,82	1,14	1,86	2,21	0,04	0,03	6,13	0,75	9,05	4,14	13,19	31,36	59,71	0,20
P3 – Cambissolo Húmico alítico típico															
Ap1	6,00	5,30	2,95	16,51	8,63	0,20	0,01	0,00	9,76	2,47	25,36	27,83	91,13	0,00	0,05
Ap2	5,01	3,82	1,58	6,54	5,22	0,05	0,02	4,64	3,00	8,85	11,84	20,68	57,24	28,16	0,12
AB	4,92	3,78	1,21	9,96	2,88	0,05	0,00	4,58	2,25	9,05	12,89	21,94	58,74	26,23	0,00
BA	4,75	3,74	0,79	8,86	2,65	0,04	0,00	5,36	2,81	7,92	11,55	19,47	59,32	31,68	0,00
Bi	4,86	3,79	0,59	1,30	1,80	0,03	0,00	5,41	1,50	5,97	3,13	9,10	34,43	63,35	0,00
P4 – Cambissolo Húmico aluminico típico															
Ap1	5,21	4,16	2,40	7,14	7,34	0,07	0,04	1,25	19,53	6,89	14,60	21,49	67,93	7,88	0,19
Ap2	5,16	3,87	1,65	4,36	5,83	0,05	0,05	4,76	2,06	8,64	10,28	18,92	54,34	31,64	0,25
AB	5,16	3,78	1,21	8,91	3,52	0,03	0,05	5,00	0,18	8,43	12,51	20,94	59,73	28,55	0,22
BA	5,24	3,79	1,03	9,54	3,82	0,02	0,02	5,06	0,37	7,61	13,41	21,02	63,79	27,39	0,08
Bi	5,28	3,83	0,73	1,40	1,98	0,02	0,00	4,17	1,12	5,25	3,40	8,65	39,35	55,04	0,00
BC	5,19	3,85	0,38	1,46	1,55	0,03	0,02	3,75	2,06	4,42	3,05	7,47	40,82	55,14	0,20
P5 – Cambissolo Húmico alítico típico															
Ap1	6,30	5,45	2,47	13,71	12,00	0,10	0,08	0,00	24,04	1,15	25,90	27,05	95,75	0,00	0,31
Ap2	4,89	3,89	1,71	1,64	2,07	0,05	0,07	4,52	3,75	9,26	3,84	13,10	29,33	54,06	0,56
AB	4,85	3,84	1,20	1,27	1,69	0,04	0,05	4,70	2,25	7,62	3,05	10,67	28,55	60,68	0,47
BA	4,99	3,85	0,94	1,26	1,45	0,04	0,05	4,11	1,31	7,14	2,80	9,94	28,20	59,41	0,50
P6 – Cambissolo Húmico alítico típico															
Ap1	4,67	3,77	2,79	10,12	3,03	0,38	0,05	4,52	8,82	8,23	13,58	21,81	62,27	24,98	0,22
Ap2	5,02	3,80	2,24	10,82	3,63	0,08	0,03	5,00	5,25	9,15	14,58	23,73	61,43	25,53	0,15
AB	4,75	3,76	1,63	1,72	2,20	0,06	0,02	7,56	3,94	9,67	4,00	13,67	29,28	65,37	0,14
BA	4,96	3,75	1,28	1,51	1,90	0,06	0,01	6,49	1,31	10,39	3,49	13,88	25,14	65,03	0,08
Bi	4,94	3,73	0,97	1,42	2,00	0,05	0,00	6,19	1,31	8,95	3,47	12,42	27,95	64,06	0,00
BC	5,07	3,73	0,64	1,26	1,67	0,04	0,05	5,59	2,25	7,10	3,02	10,11	29,82	64,97	0,49
P7 – Cambissolo Húmico lítico típico															
Ap1	5,50	3,96	2,49	10,47	3,63	0,10	0,00	2,74	9,01	7,92	14,21	22,13	64,21	16,15	0,00
Ap2	5,47	3,93	1,91	10,74	3,67	0,05	0,04	3,39	4,69	8,23	14,51	22,74	63,81	18,95	0,18
AB	5,34	3,87	1,27	1,78	2,06	0,04	0,02	4,22	2,06	7,71	3,91	11,62	33,63	51,95	0,21
BA	5,28	3,85	0,76	1,72	2,07	0,04	0,00	4,82	1,87	6,69	3,83	10,52	36,45	55,69	0,00

bases foi menor do que 65 % em todos, caracterizando o horizonte A dos solos como Húmico por causa de as suas propriedades intrínsecas atenderem os critérios exigidos para tal.

Na maior parte do horizonte subsuperficial do P6, a argila é de atividade alta; entretanto, essa é de atividade baixa no P5 e P7 e a saturação por bases é baixa (<50 %) nos três pedons, evidenciando

Quadro 2. Atributos físicos do solo nos horizontes (Hor) A e B dos pedons estudados

Hor	Areia	Silte	Argila	UV	Ds	PT	Ma	Ea	Vp	DMG
Ordem	dag kg ⁻¹			m ³ m ⁻³	kg dm ⁻³		m ³ m ⁻³			mm
P1 – Cambissolo Húmico alítico léptico										
Ap1	33,70	33,30	33,00	0,27	1,07	0,58	0,19	0,30	0,41	6,02
Ap2	33,60	31,40	35,00	0,36	1,32	0,51	0,08	0,15	0,48	6,00
AB	33,40	31,60	35,00	0,36	1,42	0,48	0,04	0,12	0,51	5,87
BA	35,24	26,76	38,00	0,32	1,38	0,49	0,07	0,16	0,50	5,49
Bi	36,32	22,68	41,00	0,32	1,55	0,46	0,05	0,14	0,53	5,02
BC	33,34	22,66	41,00	0,28	1,63	0,44	0,06	0,15	0,55	3,81
P2 – Cambissolo Húmico alítico léptico										
Ap1	21,50	40,50	38,00	0,37	1,46	0,47	0,04	0,10	0,52	6,24
Ap2	19,90	37,10	43,00	0,41	1,23	0,54	0,09	0,12	0,45	6,05
AB	19,56	32,44	48,00	0,42	1,32	0,52	0,06	0,09	0,47	6,16
BA	20,02	31,98	48,00	0,44	1,36	0,51	0,04	0,07	0,48	6,12
P3 – Cambissolo Húmico alítico típico										
Ap1	30,98	34,02	35,00	0,37	1,36	0,52	0,11	0,15	0,47	6,35
Ap2	32,68	26,32	41,00	0,37	1,45	0,48	0,08	0,10	0,51	5,93
AB	33,24	27,76	39,00	0,39	1,51	0,45	0,05	0,05	0,54	5,35
BA	31,80	26,20	42,00	0,40	1,56	0,44	0,04	0,04	0,55	5,35
Bi	27,00	29,00	44,00	0,39	1,52	0,48	0,08	0,08	0,51	2,24
P4 – Cambissolo Húmico aluminico típico										
Ap1	26,42	33,58	40,00	0,33	1,41	0,51	0,11	0,18	0,48	6,27
Ap2	23,40	30,60	46,00	0,40	1,33	0,51	0,06	0,10	0,48	5,30
AB	24,64	29,36	46,00	0,36	1,42	0,48	0,06	0,12	0,51	5,84
BA	24,62	27,38	48,00	0,38	1,47	0,48	0,05	0,09	0,51	5,89
Bi	23,00	28,00	49,00	0,43	1,48	0,49	0,03	0,06	0,50	5,72
BC	27,58	34,42	38	0,41	1,58	0,46	0,02	0,04	0,53	0,96
P5 – Cambissolo Húmico alítico típico										
Ap1	33,22	32,78	34,00	0,38	1,38	0,50	0,09	0,12	0,49	6,26
Ap2	34,34	29,66	36,00	0,39	1,40	0,46	0,05	0,06	0,53	5,98
AB	35,22	28,78	36,00	0,39	1,45	0,47	0,07	0,07	0,52	4,88
BA	35,56	25,44	39,00	0,43	1,55	0,45	0,04	0,01	0,54	4,73
P6 – Cambissolo Húmico alítico típico										
Ap1	28,92	36,08	35,00	0,32	1,10	0,60	0,23	0,28	0,39	5,94
Ap2	27,34	35,66	37,00	0,37	1,37	0,47	0,06	0,10	0,52	6,19
AB	25,26	32,74	42,00	0,36	1,38	0,50	0,09	0,13	0,49	5,71
BA	25,56	31,44	43,00	0,36	1,47	0,46	0,05	0,09	0,53	5,41
Bi	26,18	29,82	44,00	0,35	1,50	0,48	0,06	0,13	0,51	4,56
BC	28,34	28,66	43	0,35	1,51	0,48	0,07	0,13	0,51	3,04
P7 – Cambissolo Húmico lítico típico										
Ap1	31,98	38,02	30,00	0,38	1,50	0,48	0,05	0,10	0,51	6,24
Ap2	32,56	33,44	34,00	0,38	1,38	0,51	0,07	0,12	0,48	6,02
AB	32,04	31,96	36,00	0,38	1,49	0,47	0,05	0,09	0,52	5,24
BA	33,24	28,76	38,00	0,39	1,57	0,45	0,03	0,06	0,54	3,86

a natureza distrófica desses solos. A relação textural foi baixa, não indicando qualquer incremento de argila em profundidade. A cor predominante na matriz do solo do horizonte B dos pedons 5, 6 e

7 foi a bruno-escuro a bruno-amarelado escuro (8,5-10YR4/3,5). Em todos eles, o teor de Fe foi menor que 8 % (hipoférico) e não houve indicativo da presença de *slickensides* ou cerosidade. Todos os

três pedons apresentaram atividade da argila maior ou igual a 20 cmol_c kg⁻¹ de argila, saturação por Al maior do que 50 % e saturação por bases menor do que 50 % e teor de Al trocável superior a 4 cmol_c kg⁻¹, comprovando o caráter alítico.

Análise estatística

Por meio de análise fatorial, descreveram-se os fatores que explicaram a variabilidade dos dados e a correlação entre as variáveis dos solos estudados. Com os resultados da análise de fatores dos solos

nos horizontes A e B (Quadro 3), verificou-se que as proporções da variação total do solo explicadas nos três primeiros fatores para as variáveis químicas foram de 90,6 e 86,4 % para os horizontes A e B, respectivamente.

Para o horizonte A, a variabilidade do fator 1 (36,3 %) deveu-se à acidez ativa e potencial e aos teores de CO e Al trocável do solo, enquanto 32,6 % da variação total atribuída ao fator 2 foram em razão dos teores de Ca e Mg, soma de bases, CTC a pH 7 e saturação por bases e por Al (Quadro 3). Já o fator

Quadro 3. Cargas fatoriais das variáveis químicas e físicas estudadas nos três primeiros eixos dos pedons de Cambissolos nos horizontes A e B

Variável	Horizonte A			Horizonte B		
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Química						
pH (H ₂ O)	-0,927	-0,204	0,172	0,174	0,267	-0,824
pH (KCl)	-0,789	-0,297	-0,273	-0,097	0,801	-0,538
Carbono orgânico (C org)	0,936	0,073	0,025	-0,624	-0,708	-0,212
Ca ²⁺	-0,099	-0,857	0,439	0,943	0,057	0,114
Mg ²⁺	-0,493	-0,719	-0,356	0,915	-0,063	-0,393
K ⁺	0,676	0,459	0,137	-0,773	-0,496	0,344
Na ⁺	0,022	0,263	-0,954	-0,753	0,075	-0,141
Al ³⁺	0,898	0,116	0,058	-0,005	-0,819	0,048
P	-0,462	0,178	-0,822	0,049	0,336	0,846
H+Al	0,930	0,032	0,137	-0,580	-0,804	0,083
Soma de bases (S)	-0,233	-0,933	0,242	0,969	0,031	0,007
CTC pH7 (T)	0,139	-0,939	0,303	0,636	-0,701	0,085
Saturação por bases (V)	-0,469	-0,792	0,330	0,946	0,302	-0,048
Saturação por Al (m)	0,440	0,773	-0,404	-0,900	-0,342	0,074
Saturação por sódio (Na)	-0,049	0,454	-0,883	-0,757	0,227	-0,097
Atividade da argila	-	-	-	0,145	-0,445	0,775
Exploração da variância	5,443	4,894	3,253	7,302	3,852	2,669
Proporção total	0,363	0,326	0,217	0,456	0,241	0,167
Física						
Areia	0,028	-0,726	-0,663	-0,851	0,311	-0,231
Silte	0,051	0,949	-0,169	0,609	-0,466	-0,141
Argila	-0,068	0,310	0,946	0,850	-0,162	0,418
Relação silte/argila	0,052	0,362	-0,913	-0,333	-0,328	-0,538
Umidade volumétrica (UV)	-0,891	0,276	0,164	0,213	-0,873	0,007
Densidade do solo (Ds)	-0,882	-0,389	-0,046	-0,967	-0,127	0,180
Porosidade total (PT)	0,845	0,521	0,075	0,977	0,082	0,075
Macroporosidade (Ma)	0,908	-0,108	0,024	-0,018	0,818	-0,178
Espaço aéreo (Ea)	0,965	0,073	-0,068	0,265	0,869	0,029
Volume partículas sólidas (Vp)	-0,845	-0,521	-0,075	-0,977	-0,082	-0,075
Diâmetro médio geométrico (DMG)	0,279	0,859	0,140	0,864	0,120	0,119
Espessura horizontes	-0,777	-0,349	0,297	0,083	0,002	0,945
Profundidade solum	-	-	-	-0,059	-0,317	0,933
Exploração da variância	5,447	3,303	2,349	5,646	2,781	2,391
Proporção total	0,454	0,275	0,196	0,434	0,214	0,184

3 explicou 21,7 % da variação, sendo causada pelas concentrações de Na^+ e P no solo.

Para o horizonte B, notou-se que 45,6 % da variação total dos solos causadas pelos atributos químicos foram representadas pelo fator 1, principalmente pelas bases trocáveis e pela saturação por bases, por Al e por Na. O fator 2 foi responsável por 24,1 % da variabilidade, ocorrendo variações significativas nos valores de pH em sal, CO do solo, Al, H+Al e valor T, enquanto o fator 3 explicou apenas 16,7 % da variação, sendo atribuída ao pH em H_2O , ao teor de P e à atividade da argila.

A proporção da variação total explicada nos três primeiros fatores para os atributos físicos do solo foi de 92,5 % para o horizonte A e de 83,2 % para o horizonte B (Quadro 3). Para o horizonte A, o fator 1 explicou 45,4 % da variabilidade total, representada pelos atributos espessura dos horizontes, umidade volumétrica, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, espaço aéreo e volume de partículas sólidas. Já a variação do fator 2 deveu-se aos teores de areia, ao silte e ao diâmetro geométrico dos agregados, enquanto as variáveis atribuídas ao fator 3 foram a argila e a relação silte/argila,

pois esses dois fatores explicaram respectivamente apenas 27,5 e 19,6 % da variação total.

A variação dos solos no horizonte B, avaliada por meio de análise dos atributos físicos, indicou que o Fator 1 foi responsável por 43,4 %, ocorrendo variações significativas nos teores de areia e argila, volume de partículas sólidas, diâmetro médio geométrico dos agregados, densidade do solo e porosidade total. Já a variação atribuída ao fator 2 foi em razão da umidade volumétrica, macroporosidade e espaço aéreo, enquanto no fator 3 as diferenças foram por causa da espessura dos horizontes e da profundidade do solum, pois os dois fatores juntos explicaram 39,8 % da variação total.

O arranjo por afinidade dos horizontes A e B dos solos (Figura 2) foi representado por meio do dendrograma, com base na distância euclidiana (coeficientes de medida de similaridade), determinado por meio de cálculos a partir da matriz de correlação entre as variáveis estudadas, em que foi possível identificar a formação de grupos distintos.

No dendrograma pelos atributos químicos do horizonte A (Figura 2a), formaram-se três grupos

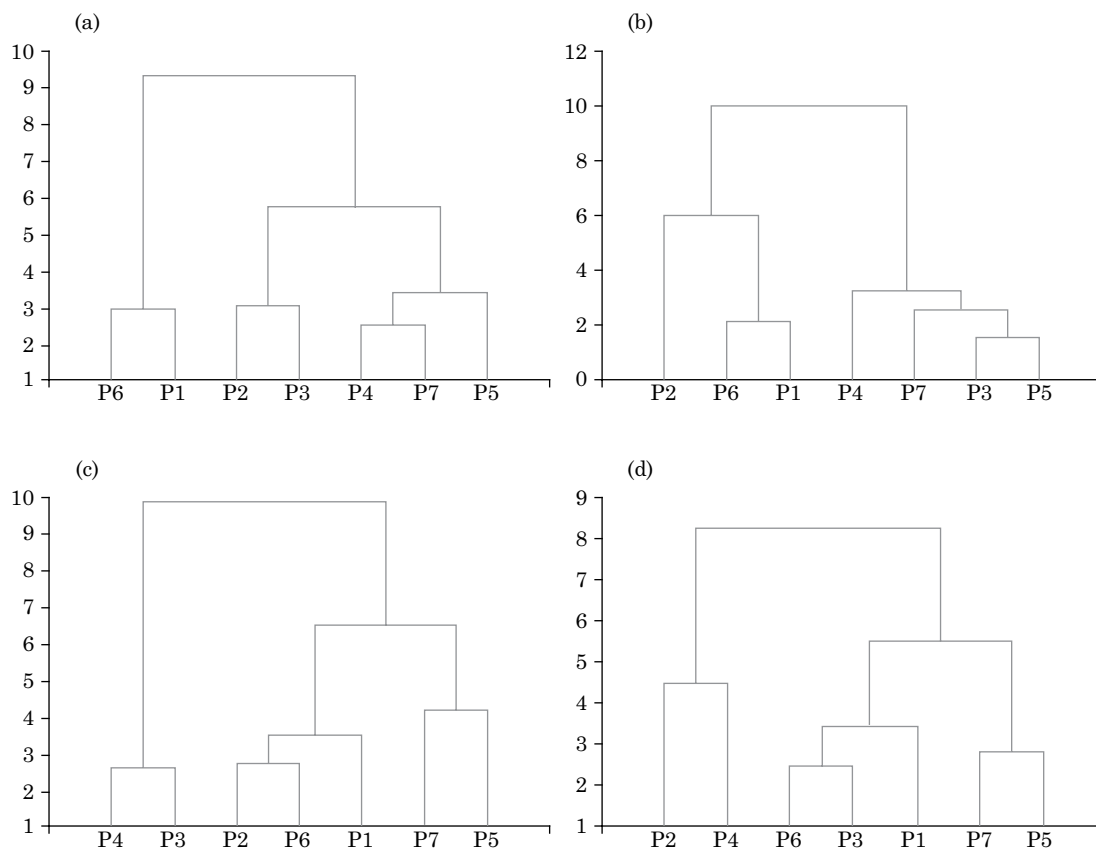


Figura 2. Dendrogramas de agrupamento hierárquico aglomerativo entre os horizontes dos pedons de Cambissolos, pelo método de dissimilaridade por distância euclidiana de acordo com atributos químicos dos horizontes A (a) e B (b) e atributos físicos dos horizontes A (c) e B (d).

distintos, levando em consideração uma distância euclidiana média entre os pedons. O grupo 1 reuniu o P6 e P1, com distância média de três; o grupo 2 foi formado pelo P2 e P3, com distância de 3,2; e o grupo 3 pelos pedons P4, P7 e P5, com distância de 3,5. No dendrograma pelos atributos químicos do horizonte B (Figura 2b), o grupo 1 foi formado pelo P4 e P3, com distância média de 2,7; o grupo 2 pelo P2, P6 e P1, com distância de 3,6; e o grupo 3 pelo P7 e P5, com distância de 4,2. No dendrograma pelos atributos físicos do horizonte A (Figura 2c), os agrupamentos foram constituídos pelo grupo 1, que reuniu o P2, P6 e P1, com distância média de 6,1; e pelo grupo 2 reunindo o P4, P7, P3 e P5, com distância média de 3,4. Por último, no dendrograma pelos atributos físicos do horizonte B (Figura 2d), teve-se o grupo 1 formado pelo P2 e P4, com distância média de 4,6; o grupo 2 constituído pelo P6, P3 e P1, com distância média de 3,5; e o grupo 3 reunindo o P7 e P5, com distância média de 2,8.

Analisando as cargas fatoriais (Quadro 3), notaram-se quais foram os atributos químicos e físicos do solo determinantes na diferenciação dos horizontes dos pedons. Portanto, a análise multivariada pode ser aplicada particularmente em levantamentos de solo e na escolha de variáveis importantes para a sua caracterização. Objetivou-se conhecer, entre os atributos do solo, os que estão associados e os que poderão influenciar no estabelecimento dos agrupamentos de pedons idênticos, podendo vir a servir de base para delineamento de unidades de mapeamento que ajudarão na definição da classificação taxonômica em nível de série de solos.

CONCLUSÕES

A técnica de análise multivariada utilizada, análise de fatores, possibilitou quantificar a contribuição dos atributos químicos e físicos na composição da variabilidade dos dados para os horizontes A e B dos Cambissolos.

A técnica de análise multivariada utilizada, análise de fatores, identificou os atributos químicos teor de carbono orgânico, acidez ativa e acidez potencial no horizonte A e a soma e saturação por bases no horizonte B, como os determinantes para a discriminação dos perfis. A distribuição e volume de poros no horizonte A, a densidade do solo e a porosidade total no horizonte B, foram os atributos físicos determinantes da discriminação dos perfis.

A classificação estatística por análise de agrupamentos dos pedons diferiu da classificação taxonômica em nível de subgrupo.

A análise de agrupamentos identificou grupos homogêneos de pedons por sua similaridade.

REFERÊNCIAS

- Barroso LP, Artes R. Análise multivariada. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2003.
- Bouyoucus GJ. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron J.* 1962;54:464-5.
- Demattê JAM, Garcia GJ. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Sci Soc Am J.* 1999;63:327-42.
- Demattê JAM, Nanni MR. Weathering sequence of soils developed from basalt as evaluated by laboratory (IRIS), airborne (AVIRIS) and orbital (TM) sensors. *Int J Rem Sens.* 2003;24:4715-38.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Brasília, DF; 2013.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Classificação dos Solos; 1997.
- Gerhardt EJ.; Fingers CAG; Longhi SJ, Schumacher MV. Contribuição da análise multivariada na classificação de sítios em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., baseada nos fatores físicos e morfológicos do solo e no conteúdo de nutrientes da serapilheira. *Ci Flor.* 2001;11:41-57.
- Hudson BD. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci Soc Am J.* 1992;56:836-41.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Manual técnico de pedologia. 2ª ed. Rio de Janeiro; 2007.
- Kemper WD, Chepil WS. Size distribution of aggregation. In: Black CA, editor. *Methods of soil analysis.* Madison: American Society of Agronomy; 1965. p.499-510. (Agronomy monograph, 9).
- Kravchenko AN, Bollero GA, Omonode RA, Bullock DG. Quantitative mapping of soil drainage classes using topographical data and soil electrical conductivity. *Soil Sci Soc Am J.* 2002;66:235-42.
- Legros JP. Mapping of the soil. Translated from french by Sarma VAK. New Hampshire: Science Publishers; 2006.
- Lepsch IF, coordenador. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4ª aprox. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 1983.
- Manly BJJ. Métodos estatísticos multivariados - uma introdução. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman; 2008.
- Mingoti SA. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: Uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.
- Moita Neto JM, Moita GC. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. *Quím Nova.* 1998;21:467-9.
- Rossiter DG, Rojas RV. Metodologías para el levantamiento del recurso suelo: Texto base. Cochabamba: International Institute for Geo-information Science & Earth Observation; 2000.
- Santos PG. Capacidade de uso do solo em microbacia hidrográfica determinada com auxílio de geoprocessamento [dissertação]. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina; 2010.

- Santos PG, Bertol I, Campos ML, Rafaeli Neto SL, Mafra AL. Classificação de terras segundo sua capacidade de uso e identificação de conflito de uso do solo em microbacia hidrográfica. *R Ci Agrovet.* 2012;11:146-57.
- Schneider RL, Mühlmann H, Tommasi E, Medeiros RA, Daemon RF, Nogueira AA. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: *Anais do 28º Congresso Brasileiro de Geologia*; 1974; Porto Alegre. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia; 1974. v.1, p.41-65.
- Silva LM. Classificação de áreas de reflorestamento misto usando análise multivariada, em Cotriguaçu - MT [dissertação]. Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso; 2008.
- Silva Júnior JF, Siqueira DS, Marques Júnior J, Pereira GT. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. *R Bras Eng Agríc Amb.* 2012;16:415-24.
- Statsoft Inc. (2007) Statistica - Data analysis software system. Version 8.0 [internet]; 2007 [acessado em 12 mar 2010]. Disponível em: <http://www.statsoft.com>.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. *Análises de solo, plantas e outros materiais.* 2ª ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995.
- Valladares GS, Gomes EG, Soares Mello CB, Pereira MG, Anjos HC, Ebeling AG, Benites VM. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de Organossolos e solos afins. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:285-96.
- Webster R, Oliver MA. *Statistical methods in soil and land resource survey.* Oxford: University Press; 1990. p.147-67.
- White IC. Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. Rio de Janeiro: DNPM, Pte I. p.1-300; Pte II, p.301-617. (Ed. Fac-similar de 1908).