

Mapeamento digital de solos com base na extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes

Pedro Höfig⁽¹⁾, Elvio Giasson⁽¹⁾ e Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, Avenida Bento Gonçalves, nº 7.712, CEP 91540-000 Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: pedro@catenaterritorial.com, giasson@ufrgs.br ⁽²⁾Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Geociências, Caixa Postal 6.001, CEP 86051-970 Londrina, PR, Brasil. E-mail: vendrame@uel.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi testar metodologias de mapeamento digital de solos (MDS) e avaliar a possibilidade de extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes. A área de referência para o treinamento do modelo localizou-se no Município de Sentinela do Sul, RS, e a extrapolação foi feita para o Município Cerro Grande do Sul, RS. Desenvolveram-se pelo MDS modelos com o uso de variáveis ambientais, como preditoras, e as classes de solos – obtidas de um levantamento convencional na escala 1:50.000 – como variáveis dependentes. Testou-se o uso combinado de dois modelos de árvore de decisão (AD), treinados em duas paisagens com diferentes classes de drenagem. Para Sentinela do Sul, a concordância dos mapas preditos com os produzidos pelo levantamento convencional foi avaliada por matrizes de erro. Como a importância dos erros de mapeamento é variável, criou-se uma matriz ponderada, para atribuir diferentes importâncias aos erros específicos de mapeamento entre as distintas unidades de mapeamento. A acurácia do mapa de Cerro Grande do Sul foi avaliada pela verdade de campo. A extrapolação dos mapas gera resultados satisfatórios, com acurácia maior do que 75%. O uso de modelos com duas AD separadas por paisagens homogêneas gera mapas extrapolados com maior acurácia, avaliada pela verdade de campo.

Termos para indexação: árvore de decisão, classe de drenagem, levantamento de solo, topodata.

Digital soil mapping based on map extrapolation between physiographically similar areas

Abstract – The objective of this work was to test methodologies for digital soil mapping (DSM) and to evaluate the possibility of map extrapolation between physiographically similar areas. The reference area for model training was located at the municipality of Sentinela do Sul, in the state of Rio Grand do Sul (RS), Brazil, and the extrapolation was done for the municipality of Cerro Grande do Sul, RS. Models were developed by DSM using environmental variables as predictors, and soil classes – obtained from a conventional soil survey at 1:50,000 scale – as dependent variables. The combined use of two decision trees (DT), trained in two landscapes with different drainage classes, was tested. For Sentinela do Sul, the agreement between the predicted maps with the ones produced by conventional survey was evaluated using error matrices. Since the importance of mapping errors is variable, a weighted error matrix was created to assign different importances to specific mapping errors between different mapping units. Map accuracy of Cerro Grande do Sul was evaluated by ground truth. Map extrapolation yields satisfactory results, with accuracy higher than 75%. The use of models with two DTs divided by homogeneous landscapes generates extrapolated maps with a greater accuracy, evaluated by ground truth.

Index terms: decision tree, drainage class, soil survey, topodata.

Introdução

O mapeamento de solos é uma demanda permanente dos órgãos de planejamento no Brasil, em razão de sua importância como ferramenta para o planejamento da ocupação racional das terras. A carência de mapeamentos decorre, entre outros motivos, das limitações para a aquisição de dados de solos ou de seus atributos, assim como da alta demanda de tempo e do custo elevado (Mendonça-Santos & Santos, 2003).

O mapeamento digital de solos (MDS) surgiu como alternativa para aumentar a viabilidade da execução de levantamentos de solos, uma vez que utiliza, principalmente, informações digitais relacionadas ao relevo.

Modelos digitais de elevação (MDE) são fontes importantes de variáveis preditoras para uso no MDS, porém, dados oriundos de outras fontes também são aproveitados, como os índices derivados de imagens de sensoriamento remoto ou mapas geológicos.

O desenvolvimento da análise digital de terreno e de tecnologias auxiliares para o mapeamento tem possibilitado a aplicação de novos métodos científicos nos levantamentos de solos (Caten et al., 2012).

O MDS é pautado pela criação e alimentação de sistemas espaciais de informações de solos, com uso de modelos numéricos para inferir variações espaciais dos tipos de solos ou de suas propriedades, a partir de observações em campo e do conhecimento dos efeitos das variáveis ambientais sobre a gênese e morfologia dos solos (Lagacherie & McBratney, 2007). Diversos procedimentos metodológicos utilizados no MDS, ainda hoje, carecem de definição, e sua aplicação, normalmente, tem-se restringido à reprodução de mapas oriundos de levantamento convencional. A extrapolação das relações solo-paisagem para áreas adjacentes e fisiograficamente semelhantes, com uso de informações obtidas de uma área de referência, não tem sido feita, ainda que esta extrapolação tenha sido proposta por Lagacherie et al. (1995), a partir da automatização do método da área de referência (Favrot, 1981). De acordo com os autores, isso reduziria a escassez de mapas de solos em grande escala, em muitos países.

O objetivo deste trabalho foi testar metodologias de mapeamento digital de solos (MDS) e avaliar a possibilidade de extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes.

Material e Métodos

O estudo foi realizado nos municípios de Sentinela do Sul e Cerro Grande do Sul, RS, situados na Mesorregião Metropolitana de Porto Alegre e limitados pelas coordenadas UTM 6.590.300 a 6.630.400 m S e 430.100 a 434.000 m E (datum SAD 69, zona 22S), com área aproximada de 28.196 ha e 32.474 ha, respectivamente. A geologia dos municípios consiste de complexos granito-gnáissicos, depósitos aluvionares, coluvionares e de barreira pleistocênica (Projeto Radambrasil, 1986). Grande parte da área sedimentar encontra-se apenas em Sentinela do Sul.

O relevo desses municípios é caracterizado pela ocorrência de três fases: plano, ondulado e forte ondulado (Lemos, 1973). O Município de Cerro Grande do Sul e parte de Sentinela do Sul situam-se no Planalto Sul-rio-grandense, que possui caráter residual. A outra parte de Sentinela do Sul localiza-se sobre as

planícies da Lagoa dos Patos e da Lagoa Mirim, áreas essencialmente planas, originadas da deposição de sedimentos recentes.

Em Sentinela do Sul, Giasson et al. (1996) relataram a ocorrência de Argissolos, Neossolos, Planossolos, Plintossolos e Gleissolos (Tabela 1), em mapeamento na escala 1:50.000. Em Cerro Grande do Sul, o Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (escala 1:750.000) (Lemos, 1973) destaca a predominância de Argissolos. Para este município, não há mapeamento de solos mais detalhado.

O clima da região é classificado como subtropical úmido, com inverno fresco a frio e sazonalidade da temperatura. Nos meses mais quentes, a temperatura média oscila entre 27 e 29°C, e nos meses mais frios entre 9 e 10°C. A pluviosidade apresenta-se bem distribuída durante o ano todo, com média pluviométrica anual de 1.400 mm (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

O MDS desenvolveu modelos com as variáveis ambientais consideradas como preditoras (independentes), e as classes de solos, como dependentes. Testou-se o uso de um único modelo para toda a área e o uso combinado de dois modelos de AD, treinados separadamente em duas paisagens homogêneas, diferenciadas pelas classes de drenagem, para gerar modelos de AD separados para cada área homogênea, uma vez que nas áreas bem drenadas ocorrem solos com material de origem magmático e, nas mal drenadas, solos oriundos de material sedimentar e formas de relevo em que processos agradacionais são predominantes. A análise das classes de solos do mapa convencional foi o critério utilizado para a distinção das paisagens em Sentinela do Sul, já que a descrição das classes, nas unidades de mapeamento (UM), indica a drenagem do ambiente. Em Cerro Grande do Sul, onde não havia mapa de solos em escala semidetalhada, a separação dos dois tipos de ambiente foi feita pela observação dos mapas gerados pelos modelos no momento da geração dos mapas digitais, em que as áreas bem e mal drenadas tornaram-se evidentes.

A base de dados que alimentou o SIG foi composta pelas variáveis ambientais e as unidades de mapeamento (UM) do mapa convencional (Giasson et al., 1996).

A análise do relevo e de todas as variáveis foi baseada no MDE originado de imagens de radar Topodata, que é um refinamento das imagens SRTM ("Shuttle Radar Topography Mission") que, por meio

de interpolações, possui resolução espacial aproximada de 30 metros (Valeriano & Rossetti, 2011).

Com o programa ArcGIS 10, a partir da extensão "Spatial Analyst", foram geradas, além da própria elevação do terreno, outras variáveis como declividade, curvatura, orientação das vertentes, distâncias dos rios, direção, acúmulo e comprimento do fluxo (Wilson & Gallant, 2000). Com a extensão "Topographic Wetness Index", foi gerada a variável índice de umidade topográfica. A geologia teve como base dados do projeto Radambrasil (Projeto Radambrasil, 1986) (escala 1:250.000), enquanto a distância dos rios foi calculada com base na malha hidrográfica vetorial de Hasenack & Weber (2010). Para a amostragem das variáveis, utilizou-se a ferramenta "Create Random Points". Foram criados 3.100 pontos amostrais aleatórios sobre o mapa do Município de Sentinela do Sul, equivalente à densidade amostral de um ponto a cada 10 ha, que é a área mínima mapeável (AMM) na escala 1:50.000. Foram utilizados aproximadamente 10% de pontos a mais, uma vez que é natural que algumas amostras ocorram em áreas mapeadas como estradas ou rios. Nos pontos amostrados, utilizou-se a função Sample, para coleta das informações de cada variável, independente ou dependente.

Os dados amostrais foram exportados do ArcGIS 10 como tabela, que foi convertida em arquivo delimitado por vírgula (CSV format) para uso no programa Weka 3.6.6, para treinamento com árvore de decisão

(Hall et al., 2009). Com a ferramenta "Select Attributes", deste programa, verificaram-se as variáveis mais importantes para o modelo, que foram usadas para treinar o algoritmo de árvore de decisão "Simple Cart".

Os modelos preditores das unidades de mapeamento foram gerados pelo algoritmo de abordagem de aprendizado de máquina supervisionado ("Simple Cart"), tendo-se correlacionado as informações pedológicas das UM com as variáveis ambientais utilizadas. Este algoritmo utiliza a classificação para implementação de podas nas AD, com mínimo custo em complexidade, e pode usar o método de instâncias fracionadas no caso de fatores faltantes. Trata-se de um modelo de regressão não paramétrico que relaciona as variáveis independentes com uma única variável dependente. O modelo é ajustado mediante sucessivas divisões binárias no conjunto de dados, para tornar subconjuntos de dados da variável resposta cada vez mais homogêneos (Breiman et al., 1984).

Os mapas de predição de ocorrência de unidades de mapeamento foram gerados a partir da implementação das regras de classificação provenientes dos modelos de AD. As regras foram utilizadas no ArcGIS 10, para cada UM, tendo-se utilizado o módulo "Raster Calculator" e seus operadores lógicos, nível a nível da árvore, até que se atingisse os nós finais. Os mapas gerados foram sobrepostos e resultaram nos mapas digitais para os municípios de Sentinela do Sul e Cerro Grande do Sul.

Tabela 1. Descrição das unidades de mapeamento no mapa de solos de Sentinela do Sul, RS (Giasson et al., 1996).

Unidade de mapeamento ⁽¹⁾	Descrição taxonômica	Inclusões	Área	
			%	ha
PV-PVA	Grupo indiferenciado: Argissolo Vermelho + Argissolo Vermelho-Amarelo	Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico	18,7	5.260
PVA-PX-SX	Associação Argissolo Vermelho-Amarelo+ Plintossolo Háplico + Planossolo Háplico	Argissolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico	6,4	1.810
PVA-CX	Complexo Argissolo Vermelho-Amarelo + Cambissolo Háplico	Neossolo Litólico	20,4	5.700
PX-SX-GX	Associação Plintossolo Háplico+ Planossolo Háplico +Gleissolo Háplico	Gleissolo Melânico	15,2	4.290
PVA-CX-RL	Complexo Argissolo Vermelho-Amarelo + Cambissolo Háplico+ Neossolo Litólico	Neossolo Regolítico	23,5	6.600
GX-RY	Associação Gleissolo Háplico + Neossolo Flúvico	Gleissolo Melânico	4,1	1.150
RL	Neossolo Litólico	Neossolo Regolítico e Cambissolo Háplico	2,3	650
GM	Gleissolo Melânico	Gleissolo Háplico	4,2	1.180

⁽¹⁾Símbolos das unidades de mapeamento de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013).

A concordância dos mapas produzidos com o mapa convencional de solos, na área de referência (Município de Sentinela do Sul), foi avaliada com o uso de matrizes de erro (Congalton, 1991), que expressam a relação entre os pixels classificados e os originais (Coelho & Giasson, 2010). Para Cerro Grande do Sul, avaliou-se a verdade de campo com 100 observações aleatórias durante percurso livre no campo, onde se compararam o tipo de solo encontrado no campo e a composição das UM previstas pelos mapas digitais produzidos. Em razão da existência de muitas UM combinadas – associações e grupos indiferenciados e complexos –, não se considerou como acerto a ocorrência de classes de solos que são inclusões nas UM. A identificação e classificação dos solos no campo foi realizada pela identificação das classes de solos ocorrentes a partir de observações morfológicas, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013).

Três indicadores de concordância foram calculados: acurácia geral, que é a proporção de classificações corretas em relação ao número total de pixels; acurácia do mapeador, que é a proporção de mapeamento correto de determinada UM; e acurácia do usuário, que é o grau de certeza de que um ponto específico no mapa, em uma determinada UM, foi mapeado corretamente (Giasson et al., 2011).

Como a importância dos erros de mapeamento e de classificação dos solos é variável, gerou-se uma matriz de erro ponderada (Tabela 2), para reduzir a importância de erros entre unidades de mapeamento com potencial de uso similar. Nas diagonais dessa matriz ponderada, foram mantidos os valores originais e, nas linhas, números de zero a um (pesos para ponderação). Esses valores foram multiplicados para obtenção da matriz de erro. Quanto mais próximo de zero, mais irrelevante

é o erro, e o aumento dos valores indica erros mais graves (Giasson et al., 2011).

Resultados e Discussão

Na área de referência, no Município de Sentinela do Sul, o uso do conjunto de modelos de árvore de decisão (AD), separados por áreas de drenagem homogêneas, obteve maior concordância com o mapa convencional (Figura 1 e Tabela 3). Este resultado difere do obtido por Giasson et al. (2006) em procedimento similar, na mesma área de estudo, mas com uso de regressões logísticas múltiplas. A utilização da técnica da matriz de erro ponderada melhorou significativamente as acurácias do mapeador, o que também foi observado por Giasson et al. (2011) e significa que muitos erros de predição nos mapas são pouco significativos, uma vez que ocorrem entre UM semelhantes quanto ao potencial de uso.

No modelo com apenas uma AD, a acurácia do mapeador variou entre 32 e 73%, e no modelo com AD combinadas, ela variou entre 31 e 82%. A concordância entre o mapa predito com uma AD e o mapa convencional foi de 47% (Tabela 3). A UM predita com maior acurácia do mapeador foi a PVA-CX-RL, que é a unidade com maior extensão espacial.

Como a maioria das informações utilizadas para predizer os solos no MDS deriva do relevo, esperava-se alta acurácia do mapeador na unidade RL, que sofre forte influência do relevo na formação da classe de solo dominante desta UM, conforme destacado por Caten (2011a). Todavia, a representatividade espacial dessa UM foi muito pequena no presente trabalho (Tabela 1), o que dificultou a predição.

A baixa capacidade dos modelos preditores de reproduzir unidades de mapeamento menos extensas é

Tabela 2. Pesos atribuídos na ponderação dos erros de mapeamento, de acordo com similaridade das unidades de mapeamento quanto ao potencial de uso do solo.

Unidade de mapeamento ⁽¹⁾	PV-PVA	PVA-PX-SX	PVA-CX	PX-SX-GX	PVA-CX-RL	GX-RY	RL	GM
PV-PVA	-(²)	0,66	0,45	0,90	0,45	0,90	0,90	0,90
PVA-PX-SX	0,66	-	0,66	0,90	0,66	0,90	0,90	0,90
PVA-CX	0,45	0,66	-	0,90	0,45	0,90	0,90	0,90
PX-SX-GX	0,90	0,90	0,90	-	0,90	0,33	0,90	0,33
PVA-CX-RL	0,45	0,66	0,45	0,90	-	0,90	0,66	0,90
GX-RY	0,90	0,90	0,90	0,33	0,90	-	1,00	0,33
RL	0,90	0,90	0,90	0,90	0,66	1,00	-	1,00
GM	0,90	0,90	0,90	0,33	0,90	0,33	1,00	-

⁽¹⁾Símbolos das unidades de mapeamento de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solos (Santos et al., 2013). ⁽²⁾Valores originais.

uma dificuldade comumente relatada em estudos desta natureza (Giasson et al., 2011; Caten et al., 2011b). Assim, as unidades com menor representatividade espacial foram as que apresentaram menores valores de acurácia do mapeador, representadas por PVA-PT-SX e RL, que apresentaram acurácias de 31 e 30%, respectivamente. Neste mesmo mapa, a unidade GX-RY não foi predita, provavelmente pela dificuldade dos modelos em discriminar UMs que ocupam posições muito semelhantes na paisagem (PX-SX-GX). Outro fator que pode ter contribuído para a dificuldade do modelo em diferenciar essas unidades é a ocorrência de consideráveis erros relativos em planícies e áreas com cotas inferiores a 50 m, conforme relatado por Pinheiro et al. (2009), em estudo com uso de MDE com resolução aproximada de 30 m. Coelho & Giasson (2010) obtiveram acurácia de 67,3%, em estudo no Rio Grande do Sul, em área com 1.000 km². Os autores mapearam apenas três UMs, entre as sete encontradas no mapa original, e atribuíram a incapacidade dos modelos de

AD de identificar as unidades não mapeadas à pequena representatividade espacial destas (aproximadamente 8,5% do território). Neumann (2012) obteve acurácia geral de 39% e classificou apenas cinco UMs, entre sete UMs presentes no mapa original, em estudo com regressão linear múltipla na Bacia do Ribeirão Gama, Distrito Federal, com área de 141 km².

Quando se considerou a divisão da área em unidades de paisagens homogêneas quanto à drenagem, os modelos gerados foram capazes de prever a ocorrência de todas as UMs na área de referência, com concordância de 56% com o mapa de referência (Tabela 3). A melhor acurácia do mapeador foi a encontrada na unidade PX-SX-GX. A unidade GM, mesmo com pequena extensão espacial, pôde ser mapeada com 54% de acurácia do mapeador. Portanto, para esse modelo de AD, separado por paisagens homogêneas, a maior acurácia não esteve relacionada à maior distribuição espacial da unidades de mapeamento.

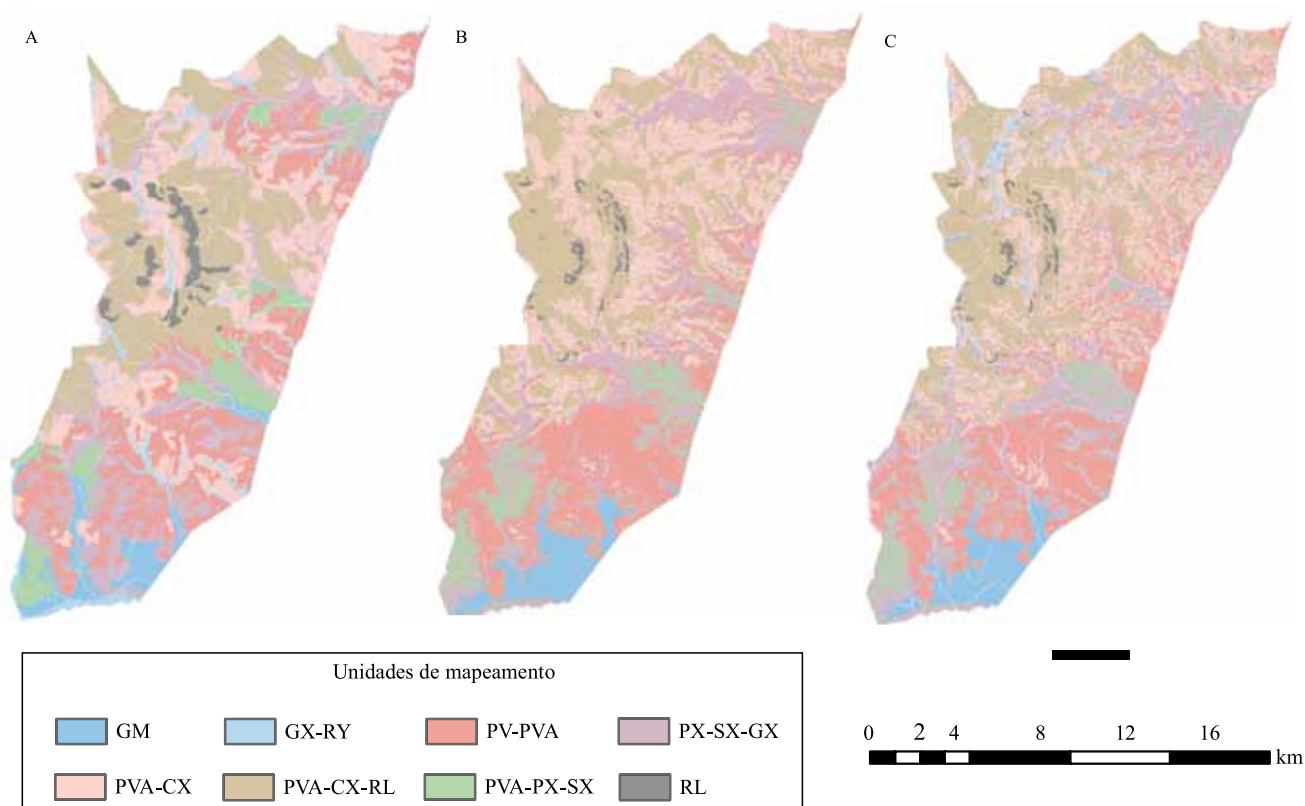


Figura 1. Mapas de solos gerados em Sentinela do Sul, RS (área de referência), de acordo com: A, mapeamento convencional; B, mapeamento digital de solos (MDS), com modelo com uma árvore de decisão (AD); e C, MDS com modelo com duas ADs.

O uso de técnicas distintas no mapeamento, a qualidade das variáveis geomorfométricas utilizadas, derivadas do MDE, a densidade amostral (Sarmiento et al., 2012), o tamanho da área de estudo ou a intensidade do efeito que o fator relevo exerce na gênese dos solos são os responsáveis pela variação nas acurácias entre diferentes MDS. Figueiredo et al. (2008), por exemplo, utilizaram regressões logísticas múltiplas e encontraram acurácia geral de 58,7%, em Arroio Portão, RS. No entanto, Giasson et al. (2006) não encontraram valores superiores a 48% com o uso da mesma técnica, em Sentinela do Sul, RS. Trabalhos com o uso de modelos de AD também variam consideravelmente quanto à acurácia geral. Bui et al. (1999) verificaram valores de 69%, em Toowoomba, Austrália, enquanto Crivelenti et al. (2009) observaram acurácia geral de 54,24%, em trabalho com a folha de Dois Córregos, SP. Sarmiento et al. (2012), em estudo para predição de classe de solos no Vale dos Vinhedos, RS, com um MDE com 5 m de resolução e uma base cartográfica digital em escala 1:5.000, obtiveram acurácia geral de 71%.

O fato de os modelos de predição não serem capazes de explicar melhor a relação entre os fatores de formação e a ocorrência de solos indica que grande parte da pedogênese não pode ser explicada apenas pelo relevo. Falhas geológicas e hidrotermalismo podem fazer com que classes de solos distintas ocorram lado a lado, distanciadas por poucos metros e na mesma posição topográfica (Giasson et al., 1996).

Tabela 3. Acurácia geral e acurácia do mapeador, de acordo com os modelos com uma e duas árvores de decisão (AD) utilizados no mapeamento digital de solos, em Sentinela do Sul, RS.

Unidade de mapeamento ⁽¹⁾	Uma AD	Duas AD	Matriz de erro ponderada	
			Uma AD	Duas AD
	Acurácia do mapeador (%)			
PV-PVA	51	67	60	81
PVA-CX	43	43	52	63
PVA-CX-RL	64	67	73	82
PX-SX-GX	46	70	57	81
GM	36	54	45	73
PVA-PX-SX	31	28	48	31
RL	30	29	32	37
GX-RY	*	20	*	40
Acurácia geral (%)	47	56	47	56

⁽¹⁾Símbolos das unidades de mapeamento, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013). *Unidade de mapeamento não predita.

Os dados de geologia foram utilizados com a intenção aproximar o modelo do paradigma de gênese do solo concebido por Dokuchaev e equacionado por Jenny (1941). Contudo, a escala do mapa geológico (1:250.000) usado para gerar o modelo pode não ter sido a mais adequada, o que fez com que as informações geológicas contribuíssem menos do que poderiam para a predição da ocorrência dos tipos de solos. Ainda assim, a variável geológica esteve entre as mais importantes nos modelos de AD. Em outros estudos, mesmo com a utilização de escalas distintas entre o mapa de solos e o mapa de geologia, os autores também verificaram que essas informações estão entre as mais influentes na predição de ocorrência de tipos de solos (Bui et al., 1999; Crivelenti et al., 2009; Lemercier et al., 2011). Chagas et al. (2010) apontaram a impossibilidade de uso do mapa geológico, em razão da heterogeneidade litológica da área estudada por eles, como possível fonte de erros.

No Município de Cerro Grande do Sul, os mapas gerados por MDS com uma ou duas ADs combinadas foram semelhantes visualmente (Figura 2) e nas extensões de terra ocupadas por cada UM (Tabela 4). O mapa gerado pelo modelo simples previu a ocorrência de seis UMs e resultou em acurácia geral de 75%, avaliada pela verdade de campo. Esse modelo não foi capaz de mapear as unidades GX-RY e GM. A UM GX-RY não poderia ser prevista, uma vez que sua predição não ocorreu na área de treinamento. O mapa gerado pelo uso conjunto dos dois modelos de AD, separadas por unidades de paisagens homogêneas, encontrou sete UMs e apresentou acerto de 78%, avaliado pela verdade de campo (Tabela 5). Esse modelo também não foi capaz de mapear a ocorrência da unidade GM mas, no entanto, previu sua ocorrência em Sentinela do Sul.

Na análise de todas as UMs em Cerro Grande do Sul, com o uso de ambos os modelos, a acurácia do mapeador (AM) foi sempre superior a 64%. As maiores AMs foram verificadas para a unidade RL, com o modelo único de AD, e para a UM PVA-PX-SX e PV-PVA, quando usados dois modelos combinados. Esse resultado indica que, possivelmente, houve influência predominante do relevo na gênese dos solos nesse município, pela ocorrência de maior diversidade topográfica entre as UMs. Da mesma forma, Bodaghabadi et al. (2011) observaram que 71,8% da

variação nas classes de solos foi resultante de fatores topográficos, em estudo realizado no Irã.

Os valores observados de acurácia indicam que a extrapolação apresentou bons resultados, em comparação aos obtidos por Caten (2011a), que realizou a extrapolação para áreas próximas e encontrou acurácia geral de 39%. O autor atribuiu a baixa acurácia à complexidade inerente à distribuição espacial do solo sobre a paisagem. Grianand et al. (2008) também relataram a redução na acurácia geral da área extrapolada, em comparação à área de treinamento.

O modelo com duas AD combinadas aumentou sua capacidade de diferenciar áreas mal drenadas; porém, em determinados momentos, criou unidades de mapeamento típicas de várzeas em áreas mais altas e bem drenadas. Observou-se o contrário no modelo que usou uma única AD, que distinguiu com maior precisão as áreas bem drenadas, mas não foi eficiente em mapear áreas de várzea, tendo indicado alguns solos típicos de ambientes altos. Esses problemas podem ser decorrentes da escala inadequada do mapa geológico, bem como da resolução (30 m) do MDE, que impossibilitaram maior detalhamento dos dados que alimentaram o modelo.

Em ambos os modelos usados, houve dificuldade na previsão da unidade PVA-PX-SX, que se confundiu com a PX-SX-GX, uma vez que são áreas semelhantes fisiograficamente: a primeira situa-se na transição de coxilhas suaves a planícies; a segunda, em relevo plano. Essa dificuldade poderia ser sanada com o uso de MDE com maior resolução, já que a resolução de 30 m tem uso limitado a áreas de topografia plana (Pinheiro et al., 2009). O mapa originado do modelo simples previu maior distribuição espacial da unidade RL (11,8% do território), que se localiza em topos de morros, em relevos que variam de forte ondulados a montanhosos. Já a unidade PV-PVA esteve localizada em coxilhas amplas, com relevo suave ondulado a ondulado (8,6% da área). A unidade PVA-CX-RL, situada em morros e coxilhas, com relevo forte ondulado, dominou espacialmente os dois mapas digitais gerados (60,7% no modelo de AD simples e 57,4% de ocupação no modelo de AD separado por paisagens homogêneas). Contudo, a unidade PVA-CX, também situada em morros e coxilhas, mas com relevo menos acidentado, foi menos representativa no mapa predito pelo modelo de AD separado por paisagens homogêneas, que a substituiu em parte pela unidade GX-RY, situada em várzeas encaixadas dos arroios.

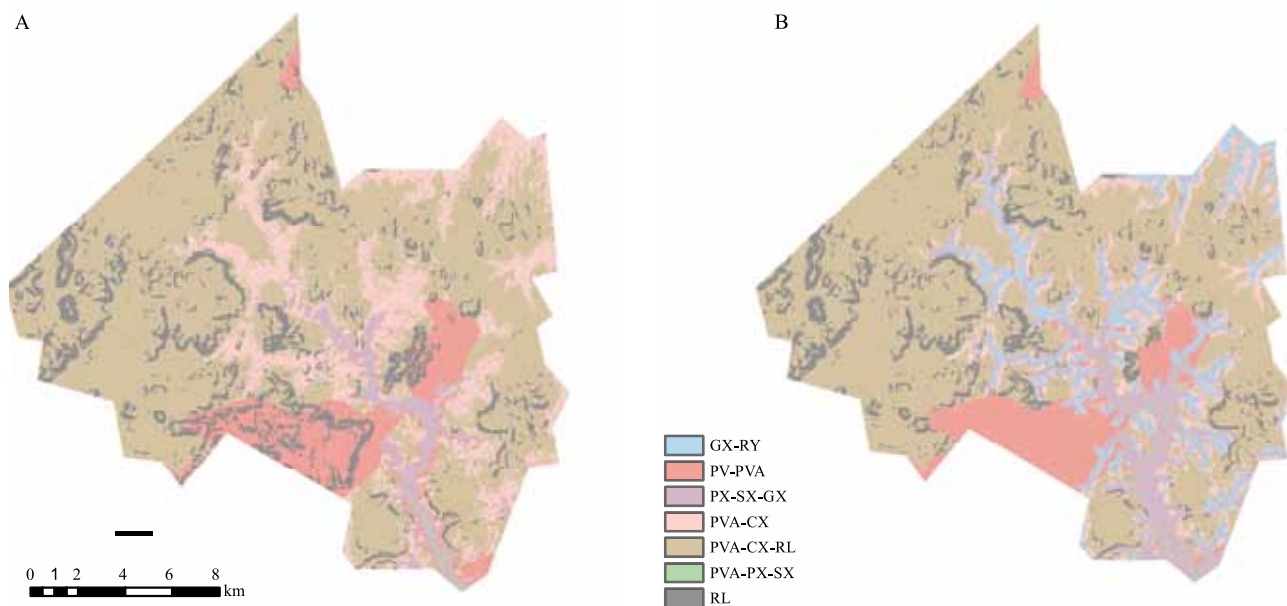


Figura 2. Mapas de solos extrapolados para Cerro Grande do Sul, RS, de acordo com: A, mapeamento digital de solos (MDS), com modelo com uma árvore de decisão (AD); e B, MDS com modelo com duas ADs.

Tabela 4. Área ocupada (%) pelas unidades de mapeamento previstas pelos modelos simples e combinado de árvore de decisão (AD), em Cerro Grande do Sul, RS.

Unidade de mapeamento ⁽¹⁾	Modelo com uma AD	Modelo com duas AD
PE-PV	8,6	8,9
PV-PT-PL	0,2	0,4
PV-C	15	7,2
PT-PL-HGP	3,7	9,9
PV-C-R	60,7	57,4
HGP-A	*	7,3
R	11,79	8,9

⁽¹⁾Símbolos das unidades de mapeamento, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013). *Unidade de mapeamento não predita.

Tabela 5. Concordância do mapa digital de solos extrapolado da área de referência com a verdade de campo, de acordo com os modelos de árvore de decisão utilizados, em Cerro Grande do Sul, RS.

Unidade de mapeamento ⁽¹⁾	Modelo com uma AD			Modelo com uma AD		
	Verificação	Acerto		Verificação	Acerto	
		Total	(%)		Total	(%)
PVA-CX	44	28	64	22	15	68
PVA-CX-RL	25	22	88	28	25	80
PX-SX-GX	11	10	91	20	16	80
RL	9	9	100	10	9	90
GX-RY	*	-	-	11	8	73
PVA-PX-SX	**	-	-	1	1	100
PV-PVA	11	10	91	8	8	100
Acurácia global (%)	75	-	-	78	-	-

⁽¹⁾Símbolos das unidades de mapeamento, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013). *Unidade de mapeamento não predita. **Unidade de mapeamento não verificada.

Conclusões

1. A extrapolação do mapa de solos para área fisiograficamente semelhante é satisfatória e possibilita gerar mapas com acurácia superior a 75%, avaliada pela verdade de campo.

2. O uso conjunto de dois modelos de árvores de decisão, divididos por paisagens homogêneas, melhora a concordância entre o mapa digital e o convencional de solos, na área de referência, e gera mapas extrapolados com maior acurácia avaliada pela verdade de campo.

3. O uso da matriz de erros ponderada melhora a acurácia do mapeador, uma vez que muitos dos erros nos mapas digitais são pouco significativos quanto ao potencial de uso do solo.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro.

Referências

- BODAGHABADI, M.B.; BODAGHABADI, M.B.; SALEHI, M.H.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; MOHAMMADI, J.; TOOMANIAN, N.; BORUJENI, I.E. Using canonical correspondence analysis (CCA) to identify the most important DEM attributes for digital soil mapping applications. *Catena*, v.86, p.66-74, 2011. DOI: 10.1016/j.catena.2011.02.009.
- BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J.; STONE, C.J.; OLSHEN, R.A. **Classification and regression trees**. Boca Raton: Chapman and Hall: CRC Press, 1984. 358p.
- BUI, E.N.; LOUGHHEAD, A.; CORNER, R. Extracting soil landscape rules from previous soil surveys. *Australian Journal of Soil Research*, v.37, p.495-508, 1999. DOI: 10.1071/S98047.
- CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; GIASSON, E. Mapeamento digital de solos: características da abordagem brasileira. *Ciência Rural*, v.43, p.1989-1997, 2012. DOI: 10.1590/S0103-84782012001100013.
- CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F. de A.; MENDONÇA SANTOS, M. de L. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. *Ciência Rural*, v.41, p.812-816, 2011a. DOI: 10.1590/S0103-84782011000500012.
- CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.53-62, 2011b. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100005.
- CHAGAS, C. da S.; FERNANDES FILHO, E.I.; VIEIRA, C.A.O.; SCHAEFER, C.E.G.R.; CARVALHO JÚNIOR, W. de. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, p.497-507, 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000500009.
- COELHO, F.F.; GIASSON, E. Comparison of methods for digital soil mapping using a geographical information system. *Ciência Rural*, v.40, p.497-507, 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010005000156.
- CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v.37, p.35-46, 1991. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90048-B.
- CRIVELENTI, R.C.; COELHO, R.M.; ADAMI, S.F.; OLIVEIRA, S.R. de M. Mineração de dados para inferência de relações solo-paisagem em mapeamento digitais de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, p.1707-1715, 2009. DOI: 10.1590/S0100-204X2009001200021.
- FAVROT, J.C. Pour une approche raisonnée du drainage agricole en France: La méthode des secteurs de référence. *CR Académie d'Agriculture de France*, 1981.

- FIGUEIREDO, S.R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C.G.; NASCIMENTO, P.C. do. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no Planalto Médio do RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2779-2785, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000700023.
- GIASSON, E.; CLARKE, R.T.; INDA JUNIOR, A.V.; MERTEN, G.H.; TORNQUIST, C.G. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in Southern Brazil. **Scientia Agricola**, v.63, p.262-268, 2006. DOI: 10.1590/S0103-90162006000300008.
- GIASSON, E.; KLAMT, E.; SCHNEIDER, P.; KÄMPF, N. **Levantamento de reconhecimento de alta intensidade dos solos do Município de Sentinela do Sul (RS)**. Porto Alegre: UFRGS, 1996. (Relatório técnico).
- GIASSON, E.; SARMENTO, E.C.; WEBER, E.; FLORES, C.A.; HASENACK, H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steeplands. **Scientia Agricola**, v.68, p.167-174, 2011. DOI: 10.1590/S0103-90162011000200006.
- GRINAND, C.; ARROUAYS, D.; LAROCHE, B.; MARTIN, M.P. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. **Geoderma**, v.143, p.180-190, 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.11.004.
- HALL, M.; FRANK, E.; HOLMES, G.; PFAHRINGER, B.; REUTEMANN, P.; WITTEN, I.H. The WEKA data mining software: an update. **SIGKDD Explorations**, v.11, p.10-18, 2009. DOI: 10.1145/1656274.1656278.
- HASENACK, H.; WEBER, E. (Org.). **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS, 2010. 1 DVD-ROM. (UFRGS. Série Geoprocessamento, 3).
- JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: McGraw Hill, 1941. 320p.
- LAGACHERIE, P.; LEGROS, J.P.; BURROUGH, P.A. A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. **Geoderma**, v.65, p.283-301, 1995. DOI: 10.1016/0016-7061(94)00040-H.
- LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B. Spatial soil information system and spatial soil inference system: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M. (Ed.). **Digital soil mapping: an introductory perspective**. Elsevier: Amsterdam, 2007. p.3-24.
- LEMERCIER, B.; LACOSTE, M.; LOUM, M.; WALTER, C. Extrapolation at regional scale of local soil knowledge using boosted classification trees: a two-step approach. **Geoderma**, v.171, p.75-84, 2012. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.03.010.
- LEMOS, R.C. de. (Coord.). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: MA-DNPA-DPP, 1973. 431p. (MA-DNPA-DPP. Boletim técnico, 30).
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 208p.
- MENDONÇA-SANTOS, M.deL.; SANTOS, H.G. dos. **Mapeamento digital de classes e atributos de solos: métodos, paradigmas e novas técnicas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 19p.
- NEUMANN, M.R.B. **Mapeamento digital de solos, no Distrito Federal**. 2012. 123p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília.
- PINHEIRO, H.S.K.; CHAGAS, C. da S.; CARVALHO-JÚNIOR, W. de; ANJOS, L.H.C. dos. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1384-1394, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900024.
- PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH. 21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1986. 796p. 5 mapas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. (Levantamento de recursos naturais, 33).
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.
- SARMENTO, E.C.; GIASSON, E.; WEBER, E.; FLORES, C.A.; HASENACK, H. Prediction of soil orders with high spatial resolution: response of different classifiers to sampling density. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1395-1403, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900025.
- VALERIANO, M. de M.; ROSSETTI, D. de F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v.32, p.300-309, 2011. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.05.004.
- WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. Digital terrain analysis. In: WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (Ed.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: J. Wiley, 2000. p.1-27.

Recebido em 30 de abril de 2014 e aprovado em 24 de novembro de 2014