

MAPEAMENTO DIGITAL DE CLASSES DE SOLOS

DIGITAL SOIL CLASS MAPPING

Daniel Nunes Krum

URI – Campus Santiago- RS

Laboratório de Solos– URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
daniel.krum@hotmail.com

Julio César Wincher Soares

URI – Campus Santiago - RS

Laboratório de Solos– URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
juliowincher@gmail.com

Claiton Ruviaro

URI – Campus Santiago - RS

Laboratório de Solos– URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
ruviaro@santiago.br

Lucas Nascimento Brum

URI – Campus Santiago- RS

Laboratório de Solos– URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
lucasbrum13@hotmail.com

Jéssica Santi Boff

URI – Campus Santiago - RS

Laboratório de Solos– URI – Campus Santiago - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
jessica_santiboff@hotmail.com;

Pedro Maurício Santos dos Santos

URI – Campus Santiago- RS

Laboratório de Topografia, Geodésia e Geotecnologias – URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
p_mauriciosantos@hotmail.com

Higor Machado de Freitas

URI – Campus Santiago- RS

Laboratório de Topografia, Geodésia e Geotecnologias – URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
higormfreitasagro@gmail.com

Matheus Ribeiro Gorski**URI – Campus Santiago- RS**

Laboratório de Solos – URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
matheusgorski3@gmail.com

Eduardo Ferreira da Silva**URI – Campus Santiago- RS**

Laboratório da Ciência da Computação – URI – Campus - RS
Avenida Batista Bonoto Sobrinho, nº 733, Santiago-RS, 97700-000
eduardo.ferreira@urisantiago.br

Resumo:

O mapeamento digital de solos (MDS) tem como base a geração de um conjunto de informações que permitem determinar relações matemáticas entre variáveis ambientais e solos e, assim, prever a distribuição espacial das classes ou propriedades dos solos. Dentre as variáveis que vêm sendo aplicadas no mapeamento digital de solos, destacam-se os atributos do terreno: declividade, aspecto, modelo digital de elevação, curvatura de perfil, índice de umidade do terreno, área de contribuição, fator LS e curvatura planar, que são derivados de modelos digitais de elevação. O presente trabalho tem como objetivo principal elaborar mapas pedológicos da URI, Câmpus de Santiago com altíssima resolução e exatidão espacial. Também, de testar diferentes algoritmos para a reprodução de mapas ultradetalhados de solos, a partir de atributos do terreno. Foram estudados solos da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Campus de Santiago, na região agroecológica do Vale do Jaguari, Estado do Rio Grande do Sul, Bioma Pampa. Os atributos do terreno analisados apresentaram-se efetivos na diferenciação dos solos. Foram geradas árvores de decisão (AD) utilizando os algoritmos Random Tree, J48 e LM Tree, para os oito atributos do terreno, posteriormente, verificou-se qual obteve o melhor índice kappa. Os atributos do terreno apresentaram-se efetivos na diferenciação dos solos. A tecnologia GNSS contribuiu para a geração de um modelo digital de elevação (DEM) de alta resolução e exatidão. A acurácia dos diferentes MDS's foram classificadas como excelentes. O algoritmo Random Tree apresentou acurácia de 100 % (1).

Palavras-chave: Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS); Levantamento de solos; Pedometria; Random Tree; desenvolvimento tecnológico e o CT

Abstract

Digital soil mapping (MDS) is based on the generation of a set of information that allows the determination of mathematical relationships between environmental variables and soils and, thus, predict the spatial distribution of classes or properties of soils. Among the variables that have been applied in the digital mapping of soils, we highlight the attributes of the terrain: slope, aspect, digital elevation model, profile curvature, soil moisture index, contribution area, LS factor and planar curvature, which are derived from digital elevation models. The present work has as main objective to elaborate pedological maps of the URI, Campus of Santiago with high resolution and spatial accuracy. Also, to test different algorithms for the reproduction of ultradetailed maps of soils, from attributes of the terrain. Soils of the Integrated Regional University of Alto Uruguai and of the Missions, Campus de Santiago, in the agroecological region of the Jaguari Valley, State of Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, were studied. The soil attributes analyzed were effective in soil differentiation. Decision trees (AD) were generated using the algorithms Random Tree, J48 and LM Tree, for the eight attributes of the terrain, after which it was verified

which one obtained the best kappa index. The attributes of the terrain were effective in soil differentiation. GNSS technology has contributed to the generation of a digital elevation model (DEM) of high resolution and accuracy. The accuracy of the different MDS's were classified as excellent. The algorithm Random Tree presented accuracy of 100% (1).

Keywords: Global Navigation Satellite System (GNSS); Soil survey; Pedometry; Random Tree; technological development and the TC

1. INTRODUÇÃO

O Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM) é uma ferramenta composta por informações gráficas, descritivas e tabulares de uma parte da superfície terrestre, contendo as propriedades em estudo corretamente georreferenciadas, possibilitando o conhecimento detalhado sobre todos os aspectos levantados (LIMA, 1999). Esta ferramenta é capaz de dividir as informações através de parâmetros e assim gerar um banco de dados espaciais.

É crescente a demanda por dados de levantamento de solos para os setores de produção agropecuária, de gestão ambiental e dos centros de pesquisa sobre mudanças climáticas (HARTEMINK; MCBRATNEY, 2008). Também, há uma demanda por informações em relação à qualidade do solo, no entanto, o homem não tem dado a importância necessária nesta questão (LAL, 1993). Assim, promover o reconhecimento do espaço físico é um subsídio imprescindível para as ações de planejamento e gestão territorial no que se refere à qualidade do solo, pois promover o reconhecimento e a manutenção da sua qualidade é de extrema importância para o bom funcionamento dos agroecossistemas.

A demanda por dados de solos tem aumentado o foco em relação aos levantamentos de solos (McBRATNEY et al., 2000), cujo levantamento identifica solos que passam a ser reconhecidos como unidades naturais de possível exploração ou preservação (EMBRAPA, 1995), e que prevê e norteia os profissionais na criação de um cadastro das classes de solos.

No entanto, o método tradicional de levantamento de solos demanda um custo elevado e tempo. Novas possibilidades tecnológicas vêm sendo estudadas e aplicadas no levantamento de solos, cujo principal objetivo é a criação de mapas digitais que diminuam a necessidade de trabalhos de campo e análises laboratoriais posteriores (McBRATNEY et al., 2003). Desta forma, a principal aplicação dessa abordagem está relacionada a predição das classes e propriedades de solos através da utilização de modelos matemáticos para a realização de um mapeamento digital dos resultados de forma contínua e espacial (McBRATNEY et al., 2003).

Conforme Zhu et al. (1997), os modelos matemáticos utilizados no mapeamento digital de solos (MDS) derivam das variáveis ambientais e dos fatores de formação dos solos, que serão escolhidos a partir do conhecimento de um pedólogo experiente da região. Contudo, o fator de formação do solo mais utilizado na predição de solos é o relevo, mas ainda há uma lacuna no MDS nacional quando a inserção de informações sobre o relevo de alta resolução (ten CATEN, 2012). A importância do relevo se dá em função da geomorfologia, que influencia a conformação dos horizontes e atributos dos solos (MOORE et al., 1993), sendo atuante no que diz respeito aos processos erosivos (MOORE et al., 1991). Uma vez que as feições do relevo condicionam os fluxos de água, sedimentos e solutos na paisagem.

Para a predição adequada dos solos, partindo de mapas pedológicos preexistentes, é necessária a reconstrução do modelo da relação solo-paisagem utilizado na sua concepção e a utilização de dados e informações espaciais de boa qualidade. Assim, a utilização de covariáveis

ambientais extraídas de um MDE com alta resolução, apresenta grande potencial para a obtenção de predições de solos com alta resolução e exatidão.

Os métodos de inteligência artificial, que tem como exemplo as árvores de decisão (AD), são dispositivos que se comunicam através do conhecimento de um usuário experiente e um software, a fim de resolver problemas complexos. Estes métodos tentam reduzir custos e tempo, aumentar a exatidão, a estabilidade e a consistência dos dados (LOPES, 2015). Estudos evidenciam que o uso da AD apresentam bons resultados no MDS e tem a vantagem de ser um modelo não paramétrico, quantitativo e que utiliza variáveis quantitativas ou categóricas (BASGALUPP, 2010). Outra vantagem da AD é a capacidade para diferenciar as classes de solo (COELHO; GIASSON, 2010; GIASSON et al., 2011).

Este trabalho é inovador ao gerar um MDS com alta resolução e exatidão apoiado na tecnologia do Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), com disponibilidade do Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK). Desta maneira, muitos estudos serão realizados utilizando essa tecnologia, não só para a classificação dos solos, mas também para a agricultura de precisão e para o mapeamento dos estoques de carbono do solo. Buscamos novas tecnologias que produzam informações mais detalhadas sobre solos do que as disponíveis atualmente, de maneira rápida e pouco onerosa e que possam auxiliar os usuários dos diferentes setores da sociedade.

O presente trabalho tem como objetivo principal elaborar mapas pedológicos da URI, Campus de Santiago – RS, com altíssima resolução e exatidão espacial. Também, testar diferentes algoritmos para a reprodução de mapas ultradetalhados de solos a partir de atributos do terreno.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MEIO BIOFÍSICO

O trabalho foi conduzido na Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Campus Santiago, numa área de 30,97 ha, localizada nas coordenadas geográficas 29° 09' 50" S e 54° 51' 32" W. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é o Cfa (MORENO, 1961). O relevo por sua vez, apresenta feições de suave ondulado a montanhoso, com altitudes que alcança cerca de 403 metros.

O componente geológico é composto principalmente por rochas sedimentares (arenitos e lutitos) e vulcânicas (basalto e riólito) distribuídas nos compartimentos geomorfológicos do Planalto da Campanha, Planalto das Missões, Planalto das Araucárias e a Depressão Central (IBGE, 2003).

Os componentes da paisagem supracitados contribuem para a formação de diferentes classes de solos, que numa escala de desenvolvimento vão de Neossolos Litólicos, passando por Neossolos Regolíticos, Cambissolos Háplicos até Argissolos Vermelhos (STRECK, 2008).

2.2 GEOMORFOLOGIA E MAPEAMENTO DE SOLOS

O Modelo Digital de Elevação (MDE) e os atributos do terreno foram elaborados com o uso de algoritmos e comandos específicos do Sistema de Informações Geográficas (SIG) SAGA (SAGA GIS, 2010).

Com resolução espacial de 0,5 m, o MDE teve como fonte de dados geodésicos pontos

coletados com o receptor do GNSS modelo Leica Viva GNSS/RTK (Base e Rover), operado no modo Semi-cinemático, no sistema geodésico SIRGAS 2000.

2.3 OBTENÇÃO DOS ATRIBUTOS DO TERRENO

Foram extraídos do MDE os atributos do terreno: elevação, declividade, aspecto, curvatura planar (C.plan), curvatura do perfil (C.perf), fator topográfico (LS) e índice de umidade topográfica (IUT). A escolha desses atributos para a caracterização geomorfológica foi baseada nos trabalhos de Moore et al. (1993), Wilson e Gallant (2000), Dlugosz (2011) e Beven e Kirkby (1979).

Obtenção dos atributos do terreno

- Elevação (m): Foi extraído diretamente do modelo digital de elevação (MDE).
- Declividade e Aspecto (graus): A derivação da superfície resultou num vetor com duas componentes a declividade e o aspecto.
- Curvatura de Perfil (m^{-1}): O atributo foi extraído com o cálculo da primeira derivada da declividade.
- Curvatura Planar (m^{-1}): O atributo foi extraído com o cálculo da primeira derivada do aspecto.
- Fator LS e Índice de Umidade do Terreno: Atributo que representa o efeito da topografia sobre a erosão e o índice de capacidade de transporte de sedimento.

$$LS = (n + 1) \cdot \left(\frac{AC}{22,13}\right)^n \cdot \left(\frac{\text{sen}\beta}{0,896}\right)^m$$

$$IUT = \ln\left(\frac{AC}{\text{tan}.\beta}\right)$$

Onde AC refere-se a área de contribuição (m^2), β é a declividade (graus).

2.4 LEVANTAMENTO TRADICIONAL DE SOLOS

O levantamento tradicional de solos envolve pesquisas de gabinete, campo e laboratório, compreendendo o registro de observações, análises e interpretações de aspectos do meio físico e de características morfológicas, físicas, e químicas dos solos, visando à sua caracterização, classificação e cartografia. Tendo em vista os objetivos do presente trabalho, foi adotado como escala de trabalho o mapeamento ultradetalhado dos solos.

Primeiramente, foram realizadas as conferências de campo, através de transecções na área de estudo, foram realizadas prospecções através de tradagens e descrição de perfis modais.

A descrição completa dos perfis de solos foi realizada conforme IBGE (2007) e Santos et al. (2017), incluindo a delimitação dos horizontes e camadas com identificação e registro das características morfológicas de cada um (a), caracterizando a transição entre horizontes ou camadas, profundidade e espessura, cor, textura, estrutura, consistência e demais características. Após a descrição foi realizada a coleta de amostras.

No laboratório, as amostras foram secas ao ar e peneiradas com malha de 2 mm (TFSA), raízes e outras partículas de matéria orgânica não decomposta reconhecíveis foram removidas.

A análise granulométrica foi realizada conforme Donagema et al. (2011). As análises químicas do pH do solo em água (pHH₂O), teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, H⁺ e Al³⁺ seguiram os métodos propostos por Donagema et al. (2011). A partir dos dados analíticos foram calculadas a CTCpH7, Al%; e V%. A determinação de carbono orgânico total (COT) do solo foi realizada pelo método por Raij et al., (2001).

As unidades taxonômicas foram estabelecidas para a área de estudo, através da interpretação dos dados analíticos e morfológicos de perfis representativos da menor unidade tridimensional de solo (pedon), a classificação seguiu o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013).

2.5 GERAÇÃO DO MDS

Os mapas ultra-detalhados de classificação dos solos foram elaborados na escala 1:1.000, com a vetorização das classes de solos ao nível de grupos no software SAGA (SAGA GIS, 2010). As extrapolações das unidades taxonômicas foram realizadas considerando as curvas de contorno e elementos de referência previamente mapeados, conforme Flores et al. (2012). Após a produção das informações descritas anteriormente foi criada uma base de dados numa planilha do Microsoft Excel®, com um conjunto de características qualitativas e quantitativas descritivas dos perfis de solo, geomorfologia e localização sobre a superfície terrestre (Projeção UTM, SIRGAS 2000). Todos esses dados foram incorporados ao banco de dados geográficos, com o auxílio do software SAGA (SAGA GIS, 2010).

Os dados quantitativos foram analisados através de cálculos da estatística descritiva, obtendo-se valores máximo, mínimo, média, coeficiente de variação. As mesmas informações foram submetidas ao teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível 95% de confiança para constatação da distribuição normal.

As árvores de decisão (AD's) foram geradas no programa Weka 3.7, utilizando os algoritmos J48, Random Tree e LM Tree (HALL et al., 2009). As AD's foram geradas para os atributos do terreno com maior poder preditivo. Entre as configurações internas para as AD's foi especificado o número mínimo de objetos (minNumObj) por folha igual a dois e selecionada a opção verdadeira para a poda da árvore (reducedErrorPruning=True), que é necessária para diminuir a extensão e complexidade da mesma.

A conversão da AD para o entendimento no Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi realizada no software ADtoSIG (RUIZ et al., 2012). O arquivo de saída do ADtoSIG gerou o MDS.

O índice Kappa da AD foi classificado de acordo com Landis e Koch (1977): $k \leq 0,2$: ruim; $0,2 < k \leq 0,4$: razoável; $0,4 < k \leq 0,6$: bom; $0,6 < k \leq 0,8$: muito bom e $k \geq 0,8$: excelente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estatísticas descritivas dos dados geodésicos obtidos com o receptor GNSS, com dupla frequência e disponibilidade RTK são apresentados na tabela 1. A variável elevação geométrica (em relação ao elipsoide) não apresentou distribuição normal, conforme o teste de Kolmogorov-Smirnov, com grau de confiança de 99%.

De acordo com os valores do coeficiente de variação (CV), a variabilidade da elevação geométrica foi classificada como baixa ($CV < 12\%$) (Tabela 1), conforme Warrick e Nielsen

(1980).

Tabela 1 - Análise estatística descritiva dos parâmetros geodésicos.

Parâmetros Geodésicos	Observações Geodésicas	Mínimo	Máximo	Média	CV (%)	K-S	SIG
Z	4552	359,751	403,804	388,537	2,240	6,043	0,000
QXX	4552	0,000	3,878	0,009	-	-	-
QYY	4552	0,000	1,477	0,051	-	-	-
QZZ	4552	0,000	5,331	0,019	-	-	-

Z: Elevação geométrica; QXX: Erro de posicionamento da longitude; QYY: Erro de posicionamento da latitude; QZZ: Erro de posicionamento da elevação geométrica.

Para a longitude, o erro médio de posicionamento foi de 0,009 m, com valor máximo de 3,878 m e mínimo de 0,000 m. A latitude teve um erro médio de posicionamento de 0,051 m, com valor máximo de 14,777 m e mínimo de 0,000 m. Finalmente, a elevação geométrica teve um erro médio de posicionamento de 0,019 m, com valor máximo de 5,331 m e mínimo de 0,000 m (Tabela 1).

O valor predito para a elevação geométrica obteve um semivariograma ajustado ao modelo exponencial. Conforme o teste da validação cruzada, a Média dos Erros Preditos (M) foi de 0,007052, a Raiz Quadrada da Média do Erro ao Quadrado (RMS) de 0,917370, com a Média dos Erros Padronizada (MS) de 0,006134 e a Raiz Quadrada da Média dos Erros Padronizados ao Quadrado (RMSS) de 0,964177, por fim, a Média da Variância dos Erros Padronizados (ASE) foi de 1,009327 (Tabela 2), este ajuste do modelo corrobora com Santos et al. (2017).

Conforme Journel e Huijbregts (1978), a partir do semivariograma é possível definir um modelo espacial que melhor descreve o comportamento de um dado no espaço.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo de semivariograma ajustados para a elevação geométrica.

Variável	Modelo	Alcance	Patamar	Pepita	M	RMS	MS	RMSS	ASE	Dependência Espacial	GDE (%)
Z	Exp.	20,84	1,95	0,00	0,00705	0,917370	0,006134	0,964177	1,009327	Forte	0

Z: Elevação geométrica; Exp.: Exponencial; M: Média. RMS: Raiz Quadrada Média; MS: Média Padronizada; RMSS: Raiz Quadrada Média Padronizada; ASE: Erro Médio Padrão; GDE: Grau de dependência espacial.

Quanto maior a dependência espacial da variável, melhor é a estrutura espacial e maior é a precisão obtida nas estimativas em locais não amostrados, por intermédio das técnicas geoestatísticas (KRAVCHENKO et al., 2006; LIMA et al., 2010). O valor de elevação geométrica apresentou grau de dependência espacial forte ($\leq 25\%$) (Tabela 1), conforme a classificação de Cambardella et al. (1994).

Os parâmetros responsáveis pelo ajuste da dependência espacial descreveram para a elevação geométrica o valor do efeito pepita de 0,00, do patamar de 1,95 e um alcance de 20,84 m. Quanto menor a proporção do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior será a dependência espacial apresentada pela variável. Por conseguinte, maior será a continuidade espacial do fenômeno, menor a variância da estimativa e maior a confiança nas estimativas (VIEIRA, 1997; LIMA, 2010). Se o valor do efeito pepita é 0, quer dizer que o erro experimental é nulo, e que não existe uma variação significativa para distâncias menores que a amostrada (TRANGMAR et al., 1985).

A figura 1 descreve a distribuição espacial das curvas de nível da área de estudo, estas curvas foram extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE) com 0,5 m de resolução espacial, obtido com a interpolação dos dados de elevação geométrica, utilizando o algoritmo de krigagem ordinária. A escolha do algoritmo de krigagem ordinária se deu em função da inexistência de tendência nos dados.



Figura 1 - Levantamento Planialtimétrico da URI, Campus Santiago.

O levantamento tradicional de solos envolveu pesquisas de gabinete, campo e laboratório, compreendendo o registro de observações, análises e interpretações de aspectos do meio biofísico e de características morfológicas, físicas, e químicas dos solos, visando à sua caracterização, classificação e cartografia. Tendo em vista os objetivos do presente trabalho, optou-se pela realização do mapeamento ultradetalhado dos solos.

Foram realizadas 102 prospecções na forma de tradagens e trincheiras, sendo que destas trincheiras, 25 foram descritas.

Conforme o levantamento tradicional de solos foi identificado seis unidades de mapeamento de solos, pertencentes a quatro ordens de solos.

Em termos de superfície ocupada, de acordo com o mapa final de solos, há um predomínio dos NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos, com 17,50 ha, correspondendo a 56,52 % da área total. Os NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Distróficos perfazem uma área de 4,11 ha (13,27% da área total), os ARGISSOLOS VERMELHOS Distróficos, ocupam uma extensão de 6,21 ha (20,05% da área total), os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos abrangem uma área de 2,18 ha (7,04% da área total), os PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos totalizam

uma área de 0,86 ha (2,77% da área total), por fim, os GLEISSOLOS MELÂNICOS Eutróficos ocupam uma área de apenas 0,11 ha (0,35% da área total) (TABELA 3).

A legenda de identificação dos solos lista todos os símbolos atribuídos às unidades de mapeamento de solos e suas respectivas denominações, constituindo a chave para a leitura e interpretação do mapa de solos. Todas as unidades de mapeamento estão representadas por um ou mais perfis descritos, coletados e analisados.

Tabela 3 - Distribuição das unidades de mapeamento por ordens de solos da URI, Campus Santiago.

Classes	Sigla	Ordens	Subordens	Grandes Grupos	Área Ocupada (ha)	Proporção (%)
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico	RLd		1	1	17,50	56,52
NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico	RRd	1	1	1	4,11	13,27
ARGISSOLO VERMELHO Distrófico	PVd		1	1	6,21	20,05
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico	PVAd	1	1	1	2,18	7,04
PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico	SXe	1	1	1	0,86	2,77
GLEISSOLO MELÂNICO Eutrófico	GMe	1	1	1	0,11	0,35
Total		4	6	6	30,97	100

Para demonstrar a elevada heterogeneidade de solos observada na área da URI Campus Santiago, foi construído, através de extrapolação em função das curvas de contorno do relevo, um mapa de distribuição de unidades de mapeamento de solos. É evidente a variabilidade das unidades de mapeamento, considerando a ocorrência de seis classes de solos numa área de apenas 30,97 ha.

Conforme Streck et al. (2008), os NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos são pouco profundos para o desenvolvimento das raízes e para o armazenamento de água e, por ocorrerem em regiões de relevo forte ondulado e montanhoso, em geral com pedregosidade e afloramentos de rochas, apresentam fortes restrições para culturas anuais; em consequência disso, devem ser mantidos sob preservação permanente. Já os NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Distróficos apresentam certas restrições para culturas anuais. Entretanto, quando estes solos apresentarem rochas decompostas e declividade < 15%, podem ser cultivados mediante práticas intensivas de conservação, com mínima mobilização do solo.

Os autores supracitados relatam que os ARGISSOLOS VERMELHOS Distróficos e os ARGISSOLOS VERMELHO-ARMARELOS Distróficos ambos possuem uma textura arenosa nos horizontes superficiais (A + E) onde ocorre uma rápida infiltração de água, que diminui no horizonte B textural devido a sua menor permeabilidade, que é mais acentuada quando ocorre uma mudança textural abrupta. Consequentemente, a saturação com água nos horizontes superficiais será alcançada tanto mais rapidamente quanto menor for a espessura dos horizontes A + E, dando início ao escoamento superficial da água. A distrofia destes solos indica baixa fertilidade química.

Os PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos aptos para o cultivo de arroz irrigado e, com sistemas de drenagem eficientes, também podem ser cultivados com milho, soja e pastagens. Na instalação dos sistemas de drenagem os taludes devem ser inclinados e a base dos canais deve estar dentro do horizonte B (por ser mais argiloso) para evitar o solapamento das paredes.

A unidade de mapeamento GLEISSOLOS MELÂNICOS Eutróficos, solos aptos para cultivo com arroz irrigado e, quando drenados, com culturas anuais como milho, soja, feijão e

pastagens. A drenagem deve ser feita em canais com taludes inclinados para evitar o solapamento das paredes. Devido à baixa condutividade hidráulica nos GLEISSOLOS mais argilosos, o uso de culturas de sequeiro exige uma sistematização do terreno para possibilitar a drenagem superficial. Necessitam de práticas de manejo e conservação do solo, tráfego controlado de máquinas e pouco revolvimento do solo.

Os resultados das estatísticas e os padrões espaciais dos atributos do terreno (Figura 2) demonstram a elevada variabilidade espacial desses atributos dentro da área de estudo, o que indica a sua vocação para o MDS.

A representação matemática da distribuição espacial altimétrica demonstra que há uma tendência de redução nos valores dessa variável na direção norte/noroeste, com valores máximos de 403 m e mínimos de 360 m. A distribuição espacial da declividade apresenta uma maior declividade no sul e no nordeste da área de estudo, variando de 0,03% a 60,03%, em feições suaves onduladas a montanhoso, conforme a classificação de Ramalho Filho e Beek (1995) (Figura 2).

Predomina na área a direção do aspecto de nordeste (0,0001%) para sudoeste (6,28%). Conforme os resultados da distribuição espacial da curvatura no plano e no perfil, na área em estudo predominam feições retilíneas no relevo. Porém, nos sentidos leste para sudoeste, oeste e leste para norte e nordeste para norte apresentam feições côncavas com fluxos convergentes. A distribuição espacial do fator LS apresenta valores altos (22,4427) norte/nordeste e sul/sudeste e valores baixos (0) de nordeste a sudeste, que indica o escoamento concentrado com alta energia, ocorre na forma de sulcos de erosão e ravinas nas feições de relevo ondulado a montanhoso, convergindo para as áreas de depósito. Os valores do IUT indicam uma tendência de maior acúmulo de água no solo próximo as áreas de depósito, com o maior potencial erosivo da enxurrada nos sítios com sulcos de erosão e ravinas acima das áreas de depósito.

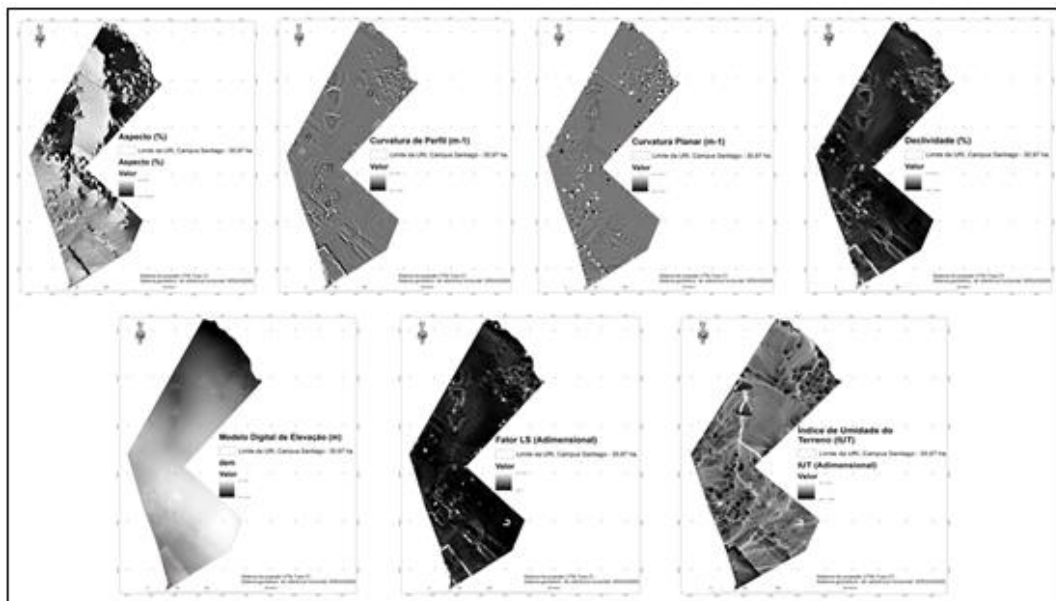


Figura 2. Mapas temáticos dos atributos do terreno da URI, Campus Santiago.

Os algoritmos J48, LM Tree e Random Tree apresentaram índice Kappa de 0,91; 0,95 e 1, respectivamente (Tabela 4). Os mesmos são retirados das AD (Random Tree) (Figura 3).

Os algoritmos J48 e Random Tree foram classificados como excelente, sendo superiores ao encontrado por Giasson et. al (2013). Da mesma forma, o LM Tree, que foi classificado como excelente, apresentando um valor superior ao encontrado por Coelho e Giasson (2010). Em trabalhos realizados por Hengl e Rossiter (2003), Silva et al. (2013) e Giasson et. al (2013) foi empregado uma resolução espacial de 30 metros nos mapeamentos. Assim, pode-se inferir uma explicação para a divergência do índice kappa, no qual pode estar relacionada com a altíssima resolução espacial do mapeamento realizado neste trabalho, que conta com o pixel de 0,5 m.

Tabela 4. Resultados da análise de diferentes algoritmos da árvore de decisão.

Algoritmo	Erros (%)	Acertos (%)	Kappa
J48	7,2	92,8	0,91
LM Tree	3,8	96,2	0,95
Random Tree	0	100	1

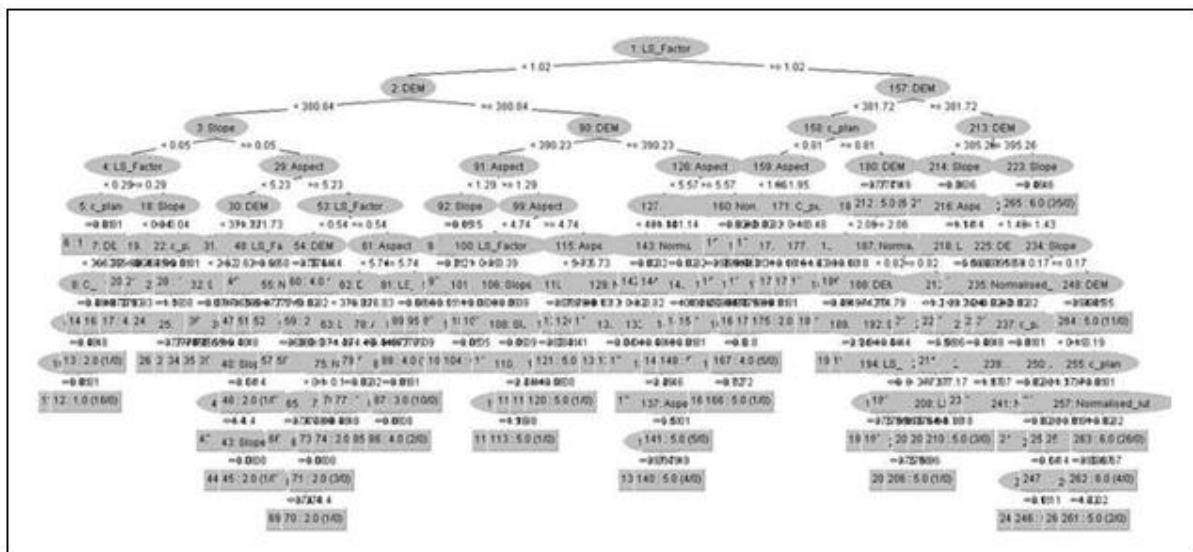


Figura 3. Árvore de decisão do algoritmo Random Tree.

Com a observação da figura 4, permite-se perceber a espacialização das unidades de mapeamento com concordância entre os dois mapas, o gerado com o levantamento tradicional de solos com o que apresentou a melhor predição, obtido com o algoritmo Random Tree, com 100 % de acerto.

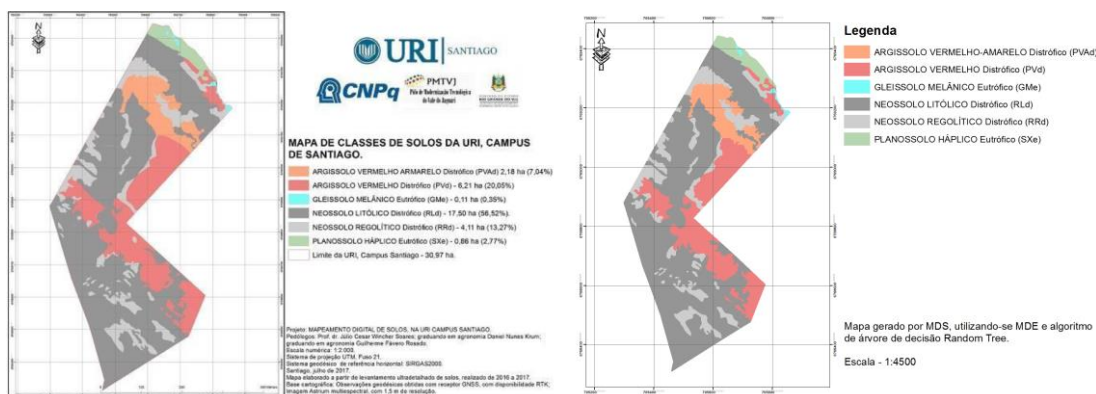


Figura 4. Mapa das classes de solos da URI, Campus Santiago e mapa gerado por Mapeamento Digital de Solos (MDS), utilizando-se um modelo digital de elevação de altíssima resolução e algoritmo de árvore de decisão Random Tree.

4. Conclusões

Os atributos do terreno apresentaram-se efetivos na diferenciação das classes de solos. A tecnologia GNSS contribuiu para a geração de um MDE de alta resolução e exatidão. A acurácia dos MDS's foram classificadas como excelente. O algoritmo Random Tree apresentou a exatidão de 100 %.

Agradecimentos

Programa Institucional de Iniciação Científica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Campus Santiago, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Secretaria do Desenvolvimento Econômico, Ciência e Tecnologia e Polo de Modernização Tecnológica do Vale do Jaguarí.

Referências Bibliográficas

- BASGALUPP, M.P. **LEGAL-Tree: Um algoritmo genético multi-objetivo lexicográfico para indução de árvores de decisão.** Tese (Doutorado) - ICMC-USP, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin of Hydrological Sciences**, v.24, p.43-69. 1979.
- CAMBARDELLA, C.A. et al. **Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils.** Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1501-1511, 1994.
- COELHO, F.F.; GIASSON, E. Comparação de métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, p.1-8, 2010.
- DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos.** 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p.230, 2011. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

DLUGOß, V. et al. Model based analysis of lateral and vertical soil carbon fluxes induced by soil redistribution processes in a small agricultural catchment. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 37, p. 193–208, 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Procedimentos normativos para levantamentos pedológicos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995. 101p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

FLORES, C. A. et al. **Os solos do Vale dos Vinhedos**. Brasília: Embrapa, 2012.

GIASSON, E. et al. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steepplands. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.68, p.167-174, 2011.

GIASSON, E. et al. Avaliação de cinco algoritmos de árvores de decisão e três tipos de modelos digitais de elevação para mapeamento digital de solos a nível semidetalhado na bacia do Lageado Grande, RS, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, p.1967-1973, 2013.

HALL, M. et al. **The WEKA Data Mining Software: An Update**; SIGKDD Explorations, 2009.

HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.B. A soil science renaissance. **Geoderma**, v. 148, n. 2, p. 123-129, 2008.

HENGL, T.; ROSSITER, D. G. Supervised Landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 6, p. 1810-1822, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapas temáticos do Projeto RADAMBRASIL do Rio Grande do Sul na escala 1:250.000**. IBGE/SAA– RS. Florianópolis, 2003. CD – ROM.

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

KRAVCHENKO, A. N.; ROBERTSON, G. P.; SNAP, S. S.; SMUCKER, A. J. M. Using information about spatial variability to improve estimates of total soil carbon. **Agronomy Journal**, v.98, p.823-829, 2006.

LAL R. (1993). Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil & Tillage Research**, 27 1-8.

LANDIS, J.R. e KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p. 159-174, 1977.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Arvore**, Viçosa, v.34, n.1, p.127-136, 2010.

LIMA, O. P. **Proposta metodológica para o uso do cadastro técnico multifinalitário na avaliação de impactos ambientais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

LOPES, J. A. T. **Generalização cartográfica com recurso a inteligência artificial**. Tese (Doutorado), Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

MOORE, I.D. et al. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.

- MOORE, I.D.; GRAYSON, R.; LADSON, A. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42 p.
- MCBRATNEY, A.; ODEH, I.O.A.; BISHOP, T.F.A.; DUNBAR, M.S.; SHATAR, T.M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3-4, p. 293-327, 2000.
- McBRATNEY, A.B.; SANTOS, M.L.M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, p.3-52, 2003.
- RAIJ, B. van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.
- RUIZ, L. F. C.; TEN CATEN, A. & DALMOLIN, R. S. D. **ADtoSIG - Software de Conversão**. Universidade Federal de Santa Maria, v.1, 2011.
- SAGA GIS System for Automated Geoscientific Analyses, 2010.
- SANTOS, E. O. J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B.; PARTELLI, F. L. Sampling Design of Soil Physical Properties in a Conilon Coffee Field. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [online], 2017, vol.41, e0160426. Epub Apr 27, 2017.
- SILVA, C.C. et al. Mapeamento Pedológico Digital da Folha Botucatu (SF-22-Z-B-VI-3): Treinamento de Dados em Mapa Tradicional e Validação de Campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.846-857, 2013.
- STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. EMATER/RS-ASCAR, Porto Alegre, 2008. 222p.
- ten CATEN, A. et al. Resolução espacial de um modelo digital de elevação definida pela função wavelet. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 449-457, 2012.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38, n.1, p.45-94, 1985.
- VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.
- WARRICK, A. W. & NILSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis (Ed.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: Wiley & Sons, 2000. p. 1-27.
- ZHU, A. X. A similarity model for representing soil spatial information. **Geoderma**, v. 77, p. 217-242. 1997.