



MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS (MDS): AVANÇOS E DESAFIOS

Maria de Lourdes Mendonça Santos, Alexandre ten Caten



O Mapeamento Digital de Solos (MDS) é definido como a “*criação e população de sistemas espaciais de informação de solos, através do uso de modelos numéricos, para a inferência das variações espaciais e temporais dos tipos de solos e de suas propriedades, a partir de observações e conhecimento dos solos e de variáveis ambientais correlacionadas*” (Lagacherie & McBratney, 2007).

Esta definição traz, em si, os principais componentes do MDS, ou seja, a necessidade de se ter informações de solos georreferenciadas, que precisam ser organizadas num sistema de informação, para serem usadas em modelagens matemáticas e estatísticas, juntamente com covariáveis ambientais relacionadas ou que influenciam a formação dos solos, para a predição de classes ou propriedades dos solos, em locais não mensurados. Isso implica que tais modelagens e predições não poderão ser realizadas sem informações prévias (de campo, laboratório,

mapas, planilhas, etc.) sobre os solos e sobre o ambiente (clima, vegetação, uso da terra, geologia, geomorfologia, material de origem, etc.).

O estado da arte em MDS, incluindo as premissas, os princípios, os métodos, as aplicações e os dados necessários para executar o mapeamento digital de classes e propriedades dos solos, foi apresentado de forma ampla por McBratney, Mendonça-Santos e Minasny em uma revisão/apresentação de método na revista *Geoderma*, em 2003, intitulada *On digital Soil Mapping*. Desde então, essa publicação é considerada uma referência seminal no assunto, com quase 700 citações nas bases *Web of Science* (669) e *Scopus* (690). Nesse artigo, os autores apresentam uma proposta genérica de protocolo para MDS, adaptando o modelo de distribuição espacial dos solos em função de seus fatores de formação, inicialmente definido por **Vasily Vasilievich Dokuchaev**, considerado o pai da Pedologia, e, mais tarde, publicado como modelo teórico

por Hans Jenny (1941), visando não apenas explicar as relações entre os fatores de formação do solo, mas, sobretudo, prever quantitativamente os solos (classes e/ou propriedades) como funções espaciais. Esse modelo foi denominado de **s.c.o.r.p.a.n.**:

$$S_{c,p} = f(s.c.o.r.p.a.n.) + e, \text{ onde:}$$

S_{c,p} (Solo, classe ou propriedade); **s**: solo, outras propriedades do solo num dado ponto; **c**: clima, propriedades climáticas do ambiente num dado ponto; **o**: organismos, vegetação, atividade humana; **r**: topografia, atributos da paisagem; **p**: material de origem, litologia; **a**: o fator tempo; **n**: espaço, posição espacial.

É uma fórmula generalizada do modelo de Jenny, que inclui a posição espacial (**n**) como condição para o mapeamento digital. Uma outra novidade é a possibilidade de prever o solo a partir de informações de solo existentes (mapas existentes de classes, propriedades, relatórios, ou mesmo *expert*

knowledge, ou seja, o conhecimento formal do pedólogo) e ainda com a estimativa de erros (e) associados (Figuras 1 e 2).

Nessa revisão são ainda discutidos os diversos métodos que podem ser usados para modelar o “ f ” da equação, ou seja, para prever, de forma quantitativa, as relações entre classes e propriedades dos solos com o seu ambiente, tais como os modelos lineares generalizados, as árvores de regressão e de classificação, as redes neurais, os sistemas *fuzzy* e a geostatística.

Os dados e informações sobre as variáveis ambientais utilizadas para a construção dos modelos também são discutidos. As mais comumente usadas são as derivadas do terreno extraídas dos MNT (Modelo Numérico do Terreno, tais como altitude e declividade) e as bandas espectrais de imagens de satélite. No entanto, há evidências de relações quantitativas com os outros fatores de formação, as quais precisam ser melhor exploradas e desenvolvidas (material de origem, geomorfologia, clima, etc.).

De forma generalizada, há uma escassez de dados de solos no mundo e, quando eles existem, são limitados e/ou dispersos, o que tem sido denominado de infraestrutura limitada de dados espaciais de solos. Sobre esse problema, a Embrapa Solos organizou uma Conferência internacional, no Rio de Janeiro, em 2006, a qual resultou na publicação do livro *Digital Soil Mapping with Limited Data*, pela Springer (Hartemink, McBratney & Mendonça-Santos, 2008). Essa necessidade e a crescente demanda por esses dados e informação sobre os solos tem alavancado o desenvolvimento do mapeamento digital de solos, especialmente no Brasil. Os desafios têm sido os de sistematizar e entender os dados existentes e a eles adicionar os dados produzidos por novos sensores, para responder às demandas da sociedade em relação às complexas ameaças de mudanças ambientais, segurança alimen-



Figura 1 - Fundamentos do Modelo *s.c.o.r.p.a.n.* (ilustrado por M.L. Mendonça-Santos)

tar, disponibilidade de água, energia e sustentabilidade ambiental.

Nesse sentido, o modelo *s.c.o.r.p.a.n.* proposto, juntamente com as funções espaciais de predição de solos e erros associados, tem se mostrado como um método particularmente importante, principalmente para áreas em que os recursos em dados e informações de solos são escassos, como é o caso do território brasileiro. Um exemplo disso tem sido o aumento considerável de aplicações do mapeamento digital de solos no Brasil (Giasson et al., 2006; Mendonça-Santos et al., 2006; Chagas et al., 2010; ten Caten et al., 2012; Carvalho Junior et al., 2014), culminando com a criação do **Grupo de Pesquisa em Pedometria** e da **Rede Brasileira de Mapeamento Digital de Solos**, com mais de 80 membros, ambos no âmbito do CNPq, com a finalidade de conectar e dar visibilidade aos pesquisadores e estudantes desenvolvendo pesquisas no tema.

No escopo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, foi criada a **Comissão 1.3 Pedometria, na Divisão 1 e o Grupo de Trabalho em MDS**. Por um lado, vários treinamentos em MDS

foram realizados pelas instituições da Rede e muitos trabalhos foram publicados, demonstrando o potencial e as vantagens do MDS, especialmente para a predição de propriedades e funções do solo, em escala local, regional e territorial. Por outro, a falta de dados e informações adequados tem prejudicado a proposição, por pesquisadores brasileiros, de novas formas de integrar e demonstrar o papel do solo em nossos ecossistemas.

Já sentimos os efeitos de nossas ações no ambiente (por exemplo, a falta d'água em São Paulo), mas qual é a nossa capacidade de modelar e simular esses eventos? Temos os dados necessários para isso? Em países onde há a disponibilidade de dados em grande escala sobre os recursos naturais, os pesquisadores da Ciência do Solo têm proposto e vislumbrado novas possibilidades de inserção dessas informações. Exemplo disso é a visão integradora dos conceitos envolvidos na Meta Modelagem do Solo (MMS) (Grundwald, 2014).

Na proposição da MMS estão envolvidas diferentes perspectivas e elementos do ambiente capturados pelos

questionamentos feitos em ‘por quê’, ‘para quê’, ‘o quê’, ‘quem’ e ‘como’. Essa abordagem emprega valores estéticos, de beleza e harmonia para explorar e produzir os diversos “papéis” do solo nos ambientes, vinculando noções de risco, vulnerabilidade, adaptabilidade e sustentabilidade.

Nesse contexto, a temática de Segurança do Solo (McBratney et al., 2014) também foi proposta como mais uma forma inovadora de integrar dados disponíveis sobre os ecossistemas. O desenvolvimento sustentável tem à sua frente grandes desafios ambientais: segurança alimentar, segurança hídrica, segurança energética, mitigação das mudanças climáticas, proteção da biodiversidade e produção e valoração dos serviços ambientais. O solo tem papel fundamental em meio a todos esses desafios, os quais estão alinhados com os objetivos do desenvolvimento sustentável pós-2015 das Nações Unidas.

Contudo, até o momento, os modelos têm incorporado a informação sobre

o recurso natural solo de forma muito limitada, sobremaneira onde dados adequados nem mesmo existem! Além disso, a degradação do solo e a diminuição da sua capacidade em exercer suas funções nos ecossistemas podem ter impactos irreversíveis em todos os desafios listados. Logo, para garantir a segurança do solo, é fundamental que sejam produzidas informações sobre esse recurso natural em escalas mais detalhadas.

A falta de informação adequada tem gerado prejuízos incalculáveis, além de não permitir que decisões apropriadas sejam tomadas a respeito da melhor forma de utilizarmos nossos recursos - entre eles, o solo (Figura 3a). Nossa capacidade de antever as consequências de qualquer evento sobre a paisagem, seja ele de origem antrópica ou natural, é, considerando os dados atualmente disponíveis, muito limitada. A busca por ‘ver antes’, através da **simulação**, demanda que recursos e dados estejam disponíveis para que possamos visuali-

zar o que irá ocorrer ‘se’.

Na sequência poderíamos atuar na **prevenção**, com a preparação e conscientização da sociedade de como reagir nas diferentes situações. Embora não se controle a forma como os **eventos** ocorrem, principalmente aqueles de origem natural, nossas **ações** deveriam ser previamente planejadas buscando otimizar recursos, diminuir impactos e modificar a forma como usamos a paisagem.

A Figura 3b exemplifica uma sucessão de eventos ocorridos por ocasião de elevados volumes de chuva, no final de junho de 2014, nas cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Uruguai, na região sul. Qual a qualidade e quantidade de informações disponíveis sobre o solo nessa região? Os dados são adequados para simulações relacionadas aos diversos papéis que o solo teve naquele evento e em outros que estão em curso neste exato momento? As respostas são de que não há dados adequados sobre o recurso natural solo e de que nossas ações são de apagar incêndios depois que eles ocorrem. Simulamos e prevenimos muito pouco, e os eventos catastróficos irão continuar a se suceder.

A Ciência do Solo tem, assim, um papel fundamental a desempenhar, fornecendo subsídios à tomada de decisão estratégica e para o estabelecimento de políticas públicas sobre o planejamento de uso e o uso sustentável do recurso natural solo. Para tanto, deverá contar com dados e informação de solos em escalas adequadas à tomada de decisão, com a harmonização desses dados em bases de dados nacionais, bem como com os recursos tecnológicos disponíveis na atualidade, para fornecer à sociedade, de forma rápida e a baixo custo, as informações e conhecimento requeridos. É preciso fornecer não apenas mapas, mas acesso aos bancos de dados, informação e conhecimento.

No Brasil, temos a excepcional vantagem do conhecimento de solos tropicais e da grande experi-

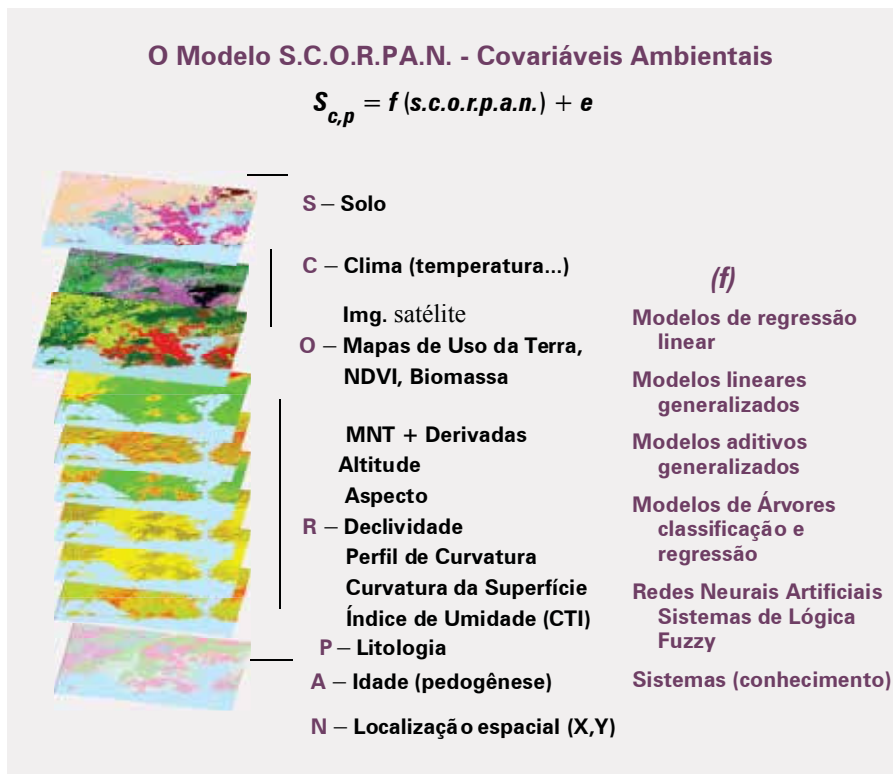


Figura 2 - Covariáveis Ambientais para o MDS, Modelo s.c.o.r.p.a.n. (ilustrado por M.L. Mendonça-Santos).

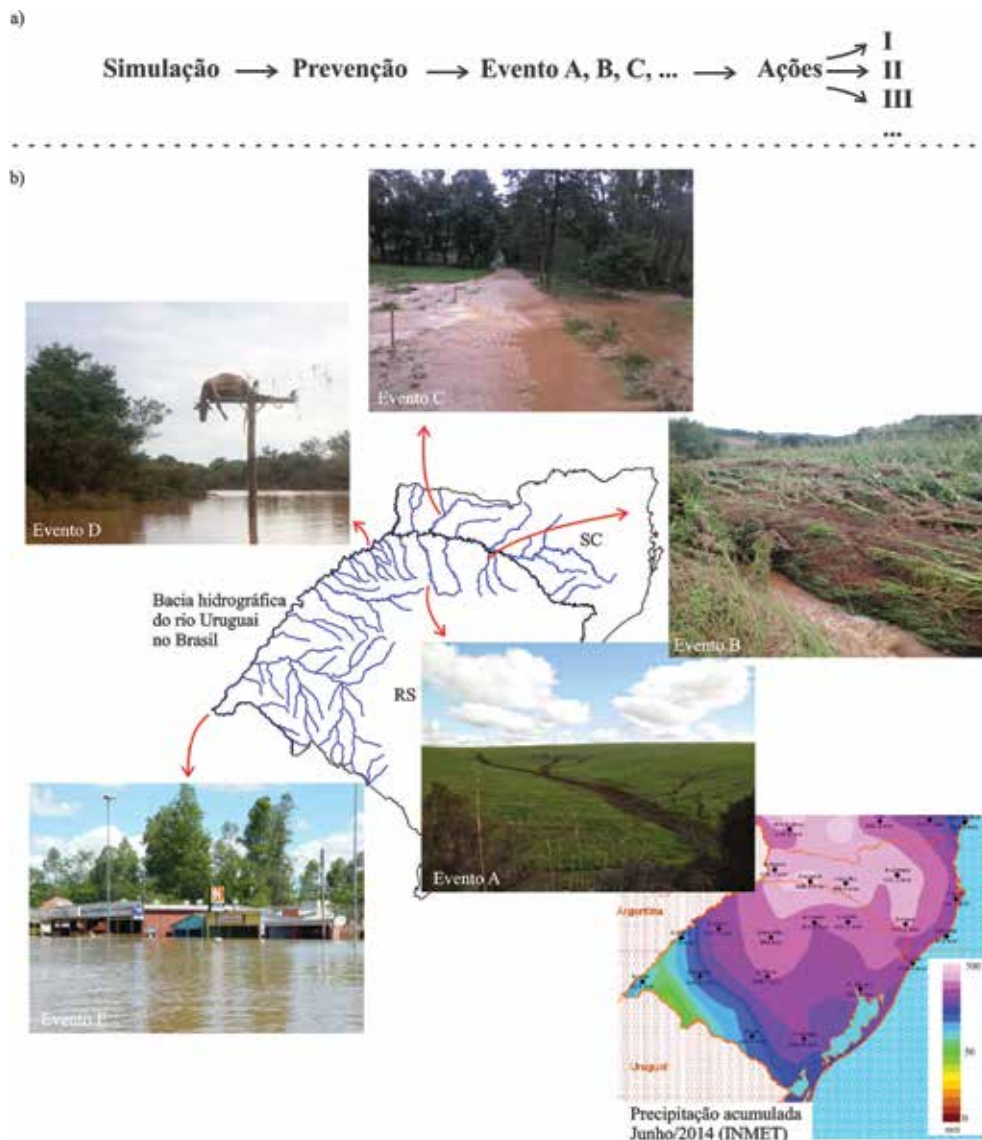


Figura 3 – a) Roteiro simplificado para aplicação de informações sobre os recursos naturais; e 3 - b) Série de eventos desencadeados por elevada precipitação ocorrida na cabeceira do rio Uruguai em junho de 2014

ência de pedólogos que têm um papel fundamental a desempenhar na construção dos modelos quantitativos de predição de solos. No entanto, esbarramos todos no problema crucial de um país em desenvolvimento, com dimensões continentais e onde os recursos naturais (solos, água, etc.) nem sempre são considerados como estratégicos, finitos e não renováveis em escala humana.

Os cientistas de solos no Brasil, que poderiam estar fornecendo subsídios

técnicos robustos para a tomada de decisão e a construção de políticas públicas, estancam todos na não existência no nosso país de dados e informações de solos em escala de planejamento, quer estadual, municipal ou local. Atualmente, o país só conta com mapas de solos para 17 estados, em escalas que variam de 1:100.000 a 1:600.000, representando aproximadamente 35% do território nacional, além de uma cobertura de todo o território nas escalas de 1:1.000.000 e 1:5.000.000, distribuídos

da seguinte forma:

- Levantamentos de solos de baixa intensidade, escalas de 1:250.000 a 1:750.000 - cobrem 84,2% do território nacional;
- Levantamentos de solos de reconhecimento de média intensidade, escalas 1:100.000 a 1:250.000 - cobrem 8,6% do território;
- Levantamentos de solos de reconhecimento de alta intensidade, escalas 1:50.000 a 1:100.000 - cobrem apenas 1,6% do território;



OPINIÃO

- Levantamentos de solos semidetalhados, escala 1:50.000 - apenas para 0,61% do território;

- Levantamentos detalhados (escala 1: 20.000 ou maior) - cobrem apenas uma área mínima de 0,0003% do território nacional.

Com a descontinuidade do Programa de Levantamento Sistemático de Solos na década de 1980, que se iniciou nos anos 50 e foi coordenado pela Comissão de Solos do Ministério da Agricultura e continuado pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos - hoje Embrapa Solos -, o Brasil ficou com grandes lacunas de conhecimento de seu recurso solo, principalmente no que diz respeito ao mapeamento em escalas mais detalhadas, necessárias ao planejamento e subsídios a políticas públicas, como zoneamentos, estudos de impactos e riscos ambientais, plano ABC, Cadastro Ambiental Rural (CAR) e outros.

O Banco de Solos do Brasil, organizado pela Embrapa, foi disponibilizado para a sociedade brasileira (www.bd-solos.cnptia.embrapa.br) e conta hoje com mais de 9 mil perfis de solos. Não são tantos dados como podemos pensar de início. Além da baixa densidade, eles não possuem uma boa distribuição por região. Muitos desses perfis não apresentam coordenadas geográficas de sua localização, o que é *conditio sine qua non* para seu uso nas predições de MDS.

Mesmo assim, esse banco e sua disponibilização para a sociedade é um primeiro passo para o uso das informações de solos e para incentivar outras instituições a se juntarem a essa inicia-



Figura 4: Jovens pedólogos formando seu próprio conhecimento tácito e aplicando técnica de Espectroscopia de Reflectância Difusa para o mapeamento de solo.

tiva. Apesar disso, falta uma política de Estado sobre a governança dos solos, para coordenar as iniciativas existentes em diferentes instituições e assegurar um novo programa de levantamento de solos, que seja multiescalas e interinstitucional, otimizando as questões de infraestrutura, equipamentos e pessoas capacitadas. Esse programa teria resultados a curto, médio e longo prazos, em termos de dados e informações de solos (dados de solos, mapas, interpretações de uso, mapeamento digital de propriedades e funções específicas dos solos...), e serviria ainda como uma plataforma para o treinamento e a capacitação de um novo contingente de especialistas em solos, com conhecimentos

em pedologia e em novas tecnologias, a exemplo dos sistemas de informação geográfica, modelagem e aplicação de novos sensores (Figura 4).

Só assim se poderia, então, através do conhecimento formal e dos métodos e técnicas em mapeamento digital de solos, responder, de forma rápida e otimizada, às demandas nacionais e globais em informações de solos, a exemplo de estudos de impactos, mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (eventos extremos, desertificação, deslizamento de terras), produtor de água e outros serviços ambientais.

As referências bibliográficas deste artigo podem ser solicitadas pelo e-mail: boletim@sbc.org.br