ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Análise da eficiência dos métodos indiretos para o mapeamento de solos frente às técnicas diretas, e suas possíveis associações: Uma revisão metodológica

José Gustavo da Silva Nunes¹, Rogério Uagoda²,

¹ Mr. em Análise de Sistemas Naturais pelo programa de Pós-Graduação em Geografia (UnB), Bacharelado e Licenciatura em Geografia (UnB), Geologia (UnB). Departamento de Geografia, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70910-900. Brasil. (61) 31077257. jgustavosn@gmail.com ² Dr. Pesquisador, Departamento de Geografia, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70910-900. Brasil. (61) 31077257. rogeriouagoda@unb.br

Artigo recebido em 24/09/2019 e aceito em 21/03/2020

RESUMO

Este artigo é uma revisão metodológica de técnicas indiretas de mapeamento pedológico, SIG e sensoriamento remoto dentro do mapeamento digital de solos, espectrorradiometria e Georadar (GPR), comparados análise da paisagem. Pesquisas tem demonstrados que o mapeamento digital de solos (MDS) é uma ferramenta eficiente desde o início do ano 2000, associadas a outros métodos como o sensoriamento remoto e análises laboratoriais, o MDS forneceu ao mundo mapas que representam bem a realidade dos solos. Mas as técnicas diretas ainda são usuais e eficientes, e podem ser associadas aos métodos indiretos, para que informações locais de mapeamento possam ser dispersadas regionalmente. A busca por técnicas de baixo custo, eficiência e praticidade tem levado pesquisadores a buscarem técnicas como o Georadar para verificar a profundidade do solo, sem que seja necessário a destruição de perfis por meio da abertura de trincheiras, como também ao uso de imagens de radar que disponibilizam um produto de alta resolução espacial, independentemente da altitude da plataforma, e que tem auxiliado na extração de diversas informações da paisagem diretamente ligadas à pedogênese. A espectrorradiometria é uma metodologia que trabalha com mensuração da energia eletromagnética radiante, e permite fazer associações rápidas entre alvos e curvas espectrais, permitindo a criação de bibliotecas globais destas curvas. A radiometria por sua vez tem sido amplamente utilizada em sistemas que operam na faixa de frequência de micro-ondas, que variam entre 1mm à 1m de comprimento, e permitem localizar objetos. Esta pesquisa tem o intuito de buscar a evolução do mapeamento pedológico através das diversas técnicas citadas, e bem como a associação entre os diversos métodos para gerar um mapa de solos de alta precisão.

Palavras Chaves: Mapeamento de Solo; GPR; Espectrorradiometria; Sensores Orbitais.

Efficiency analysis of indirect methods for soil mapping against direct techniques, and their possible associations: A methodological review

ABSTRACT

This article is a methodological review of indirect techniques of pedological mapping, GIS and remote sensing within digital soil mapping, spectroradiometry and Georadar (GPR), compared to landscape analysis. Research has shown that digital soil mapping (MDS) has been an efficient tool since the beginning of the year 2000, combined with other methods such as remote sensing and laboratory analysis, MDS has provided the world with maps that represent the reality of soils well. But direct techniques are still common and efficient, and can be associated with indirect methods, so that local mapping information can be dispersed regionally. The search for low-cost, efficient and practical techniques has led researchers to look for techniques such as Georadar to check the depth of the soil, without the need to destroy profiles by opening trenches, as well as using radar images. which provide a high spatial resolution product, regardless of the platform's altitude, and which has helped in the extraction of various landscape information directly linked to pedogenesis. Spectroradiometry is a methodology that works with the measurement of radiant electromagnetic energy, and allows for quick associations between targets and spectral curves, allowing the creation of global libraries of these curves. Radiometry in turn has been widely used in systems that operate in the microwave frequency range, ranging from 1mm to 1m in length, and allow you to locate objects. This research aims to seek the evolution of pedological mapping through the various techniques mentioned, as well as the association between the various methods to generate a highly accurate soil map.

Keywords: Soil Mapping; GPR; Spectroradiometry; Orbital Sensors.

Introdução

O mapeamento de solos é uma das primeiras fases para uso, manejo e preservação de uma área ambiental. Não há como falar em mapeamento sem antes passar por estudos de pedometria, termo criado por Alex McBratney da Universidade de Sydney para descrever o estudo quantitativo da variação do solo. O mapeamento tradicional, envolvendo coletas de campo, tradagens, pedometria em trincheiras ainda hoje é usual, sendo a mais importante fonte de classificação do solo, além da confirmação de informações referentes a pedologia. Mas devido a importância da preservação, o uso de técnicas indiretas tem avançado no sentido de dar mais agilidade neste processo, sem a necessidade de destruir parcialmente os perfis ou horizontes diagnósticos do solo. Embora a informação correta e precisa acerca do solo constitua um desafio, devido à divergência de termos, desatualização, generalização e imprecisão dos métodos (Sanchez, 2009).

O solo é produto da ação concomitante do clima e de organismos que atuam desgastando material de origem (rocha), que dependendo do tipo de relevo poderá intensificar ou retardar o processo. Todos estes fatores devem ter uma continuidade ao longo do tempo para desenvolver um perfil do solo. Durante sua formação, o solo poderá passar por processos de desenvolvimento como perdas, transformações, translocações e adições. Sendo assim estes sistemas ambientais estão entre os mais complexos devido a diversidade de processos e interações envolvidos em sua formação. Por se tratar de um sistema aberto com contínuo fluxo de massa dentro e fora do sistema em diversas fases (líquido, gasoso e sólido), estes sistemas são muito sensíveis às interferências antrópicas devido ao manejo e uso (Young e Crawford, 2004). E atualmente, pesquisas consideráveis sobre o solo são realizadas fora do domínio imediato dos departamentos e centros de pesquisa em ciências do solo (Hartemink, 2016).

A falta de informações abrangentes sobre solos em escala global, nacional ou local aumenta o risco de se tomar decisões políticas equivocadas, e manter uma contínua degradação evitável deste recurso, que poderá ser irreversível, causando problemas relacionados à segurança alimentar, além de provocar danos a outros recursos terrestres como a água e atmosfera (Mulder et al., 2011).

Devido à complexidade de um sistema pedológico, uma série de técnicas, que fazem mensuração de umidade, composição, cor, fração e

profundidade tem sido empregada no mapeamento afim de se obter resultados mais precisos e confiáveis. Para se fazer estas mensurações indiretas, a utilização de ondas eletromagnéticas através de Georadar, sensores orbitais, que são emissores e receptores, e expressam suas informações em radargramas ou em curvas espectrais, é feita com maior frequência.

Um levantamento pedológico para fins de mapeamento ocorre com o uso de “ferramentas convencionais”, envolvendo fotointerpretação (com a utilização de bibliografias prévias), com a delimitação das unidades fisiográficas (Souza et al., 2016). Esta ferramenta primária facilita a próxima etapa que envolve a coleta e verificação dos dados de campo, e tanto para a confirmação quanto para correção de dados. Os limites entre as zonas homologas são de difícil diagnóstico em campo, tendo em vista que a fronteira entre solos nunca ocorre de maneira abrupta, mas é transicional ou gradual, exigindo técnicas holísticas apuradas.

Mas segundo Demattê et al. (2016), o sensoriamento remoto se apresenta como uma alternativa para a delimitação de solos, tendo em vista a eficiência e velocidade dos mapeamentos através de sensores orbitais, que em um curto espaço de tempo tem oferecido produtos com acurácia cada vez maior. As técnicas de sensoriamento envolvem variadas classes de sensores, mas para este trabalho apenas duas serão abordadas, envolvendo os sensores multiespectrais e os sistemas ativos com radares de abertura sintética (SAR). Outros métodos envolvendo ondas eletromagnéticas como o Georadar, também tem se apresentado como ótimas opções de técnicas não destrutivas e de bom custo benefício (Van Dam, 2012).

A União Internacional de Ciência do Solo (IUSS), já no ano de 1960, em seu 7 congresso, previu a necessidade e importância dos mapas de solos, e com o acompanhamento da FAO e da UNESCO, recomendou que fosse construída uma base de dados com relatórios e um mapa de solos mundial na escala de 1:5.000.000. Este projeto teve início no ano de 1961 e foi concluído vinte anos depois, cujo os resultados produzidos, envolvendo mapas e relatórios, estão disponíveis no site da FAO (2019).

Além das bases de dados globais, existem inúmeras bases de diversas nacionalidades, de forma que há muita informação disponível sobre o

solo. No entanto, um grande problema é a inconsistência na aquisição de dados, porque as informações são coletadas por diferentes pesquisadores, em várias escalas, usando diferentes padrões e métodos, além destes fatores a crescente disponibilidade de ferramentas no mercado tem produzido resultados em tempo muito menor, pois a aquisição de dados se tornou muito mais eficiente. Porém, o problema gerado é como estes dados estão sendo tratados, processados e difundidos. Estes produtos que chegam ao meio científico são confiáveis? Existe a possibilidade de se chegar às ferramentas ideais e ao processamento adequado para se gerar mapas e outros produtos relacionados a pedologia sem grandes distorções da realidade, ou equívocos que prejudiquem no uso ou manejo do solo?

O objetivo deste trabalho é realizar uma pesquisa das metodologias indiretas aplicadas em mapeamento de solos, visando a eficiência dos diferentes métodos para esta finalidade, além das possíveis integrações entre essas e as ferramentas diretas, que compreende a coleta de amostras, tradagem e pedomorfometria. As técnicas indiretas que serão abordadas envolvem Georadar, obtenção de curvas espectrais através do sensor FieldSpec 3, imagens LandSat 8, Aster e Alos Palsar.

Mapeamento digital de solos

O desenvolvimento de cenários pedológicos, e soluções para a preservação, manutenção e uso sustentável requerem informações e conhecimento das propriedades e das funções do solo. Além disso, se faz necessário que as informações estejam disponíveis de maneira espacial, para que possam ser facilmente atualizadas e usadas para uma série de estudos e interpretações (Arrouays et al., 2017).

Tradicionalmente, imagens de sensoriamento remoto têm sido usadas para apoiar a segmentação da paisagem em unidades de solo-paisagem bastante homogêneas para as quais a composição do solo pode ser estabelecida por amostragem. Usada como uma fonte de dados secundária, as imagens de sensoriamento remoto podem suportar a interpolação espacial de dados de propriedades do solo amostrados de forma esparsa (Mulder et al., 2011). O processo de interpolação é uma das ferramentas mais comuns na análise de imagens em sensoriamento remoto. Algumas aplicações de interpolação permitem reconstrução, restauração e ampliação de imagens (Khosravi e Samadi, 2019)

Figura 1. Conjunto de informações para o mapeamento digital de solos. Fonte: Caten et al., 2012.

O mapeamento digital de solos (MDS) é um conjunto de técnicas que visa compilar dados de coleta, armazenamento, análise, interpretação em um mapa de solos, permitindo predileção da distribuição espacial das classes pedológicas, conforme está ilustrado na Figura 1. Dobos et al. (2002) utilizou-se do termo “mapeamento digital do solo” como forma de integrar mapas de solo com imagens de sensoriamento por satélite e modelo de elevação digital (MDE). Mas este tipo de trabalho passou a ser amplamente reconhecido e divulgado a partir do primeiro “Global Workshop” sobre Mapeamento de Solos Digitais que foi organizado em Montpellier em 2004 (Lagacherie et al., 2007), após a publicação de um artigo sobre mapeamento digital do solo (Mcbratney et al., 2003). No MDS, utilizam-se dados e informações de solos existentes, aliados a novas tecnologias (imagens de sensores remotos, sistemas de informação geográfica, instrumentos para a coleta in situ e georreferenciada), os quais permitem, por meio de modelagem matemática, a elaboração de mapas de diversos atributos e de classes de solo, e com acurácia conhecida (Lagacherie et al., 2007).

O sucesso do mapeamento digital do solo é uma confluência de vários fatores, que teve início na década de 2000, e incluiu o aumento da disponibilidade de dados espaciais (modelo de elevação digital, imagens de satélite), a disponibilidade e evolução do poder computacional para processar dados, o desenvolvimento de ferramentas de mineração de dados, GIS e inúmeras aplicações além da geoestatística (Minasny e Mcbratney, 2016; Arrouays et al., 2017). A modelagem matemática através da mineração de dados tem sido aplicada em vários estudos pedológicos, como nos trabalhos Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016, que se utilizou de seis métodos incluindo redes neurais artificiais, regressão vetorial de suporte, vizinho knearest, florestas aleatórias, modelos de árvores de regressão e programação genética que foram combinados com splines de suavização de áreas iguais, afim de se determinar as variações laterais e verticais de matéria orgânica nos solos da região de Baneh, Irã. E embora os resultados não tenham sido

satisfatórios como o esperado, este tipo de técnica tem evoluído.

Em trabalhos recentes como o de Biswas e Zhang (2018) , tem se utilizado com maior frequência o Design de Amostragem (DA), para aumentar a eficiência do MDS, já que uma boa cobertura dos recursos no espaço garante uma estimativa precisa dos parâmetros de regressão, enquanto que a cobertura espacial contribui para a efetiva interpolação. Basicamente, esses dados tem a finalidade de espalhar uniformemente coletas locais em um espaço geográfico, com base em inferências estatísticas rigorosas (Royle e Nychka, 1998), de forma que cada unidade de amostragem é selecionada aleatoriamente e de forma independente. Todas as potenciais unidades de amostragem têm probabilidades iguais de serem incluídas e, assim, permitem estimativas imparciais da média e da variância, tomando precauções como por exemplo não colocar artificialmente mais pontos em “áreas suspeitas”, com maior variabilidade espacial em um campo heterogêneo.

Em MDS, os atributos topográficos primários (Declividade e Curvatura do Terreno) e secundário (Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos - ICTS) podem ser utilizados como variáveis na equação do modelo, e podem ser obtidos em qualquer Modelo Digital de Elevação de Terreno, assim, serão trabalhados através de softwares de SIG (Silva et al., 2018).

Para Wood (2009), os programas de código fonte fechados limitam a comunicação dos procedimentos executados para a obtenção de determinado resultado, uma propositiva a este problema seria a utilização de programas com código fonte aberto (SAGA, GRASS, ILWIS, QGIS e o pacote estatístico R por exemplo), que tem uma grande rede de colaboradores. O autor realizou um estudo detalhado sobre o uso de alguns softwares abertos e fechados, criando algumas tabelas sobre a relação de uso de alguns softwares, tendo como ponto de partida a sua disponibilidade no mercado, e por quanto tempo foram utilizados, até a criação de uma nova versão.

Figura 2. Cronogramas mostrando a disponibilidade pública do software de geomorfometria. Fonte Wood, 2009.

Já foi realizado um levantamento bibliográfico vasto sobre os trabalhos de MDS brasileiros até o ano de 2011, e foi verificado que o primeiro trabalho deste gênero ocorrido no Brasil foi apenas no ano de 2006, ano em que foi sediado, no Rio de Janeiro, o 2º Workshop Global em Mapeamento Digital de Solos. Segundo o autor, este interesse mais recente pode ter ocorrido devido a disponibilidade tardia de hardwares e softwares no país.

Segundo Caten et al. (2012), o MDS aplicado à predição de classes de solos no Brasil tem ocorrido em níveis de semidetelhe que compreende uma escala de 1:50.000. O autor afirma ainda que estes mapas de solos têm condicionado a extensão territorial da maioria dos trabalhos. Entre os estudos de MDS realizados no país, predomina a utilização de softwares proprietários.

Até o momento, diversos autores trabalharam com variadas formulas e modelos para desenvolver um MDS, mas não há uma metodologia coerente estabelecida, onde abordagens de segmentação espacial, medidas de propriedades do solo e interpolação usando dados de sensoriamento remoto são integrados de forma holística para alcançar uma cobertura completa da área, porem a precisão deste tipo de técnica tem melhorado, e quando associada a outras

ferramentas, tem produzido bons mapas e outros subprodutos importantes para uso, manejo e conservação do solo.

O cenário para o uso de ferramentas voltadas para a criação de MDS tem se mostrado favorável, principalmente no que tangencia as técnicas de coleta, processamento de dados, formação e desenvolvimento de modelos.

Georadar

A utilização do Georadar para estudos de solo e rocha *in situ* tem avançado cada vez mais nas últimas décadas (Neil, 2004), sendo que as primeiras utilizações de ondas de rádio de alta frequência para mapeamento de estruturas em subsuperfície foram realizadas em fins da década de 1920 por W. Stern. Devido ao emprego de ondas eletromagnéticas o Georadar é capaz de detectar descontinuidades elétricas na subsuperfície rasa (profundidades <50 m), através de pulsos de alta frequência destas ondas, geradas, propagadas e recebidas pelo próprio equipamento. Este através do comportamento (reflexão) da energia no meio em questão é capaz de identificar alvos (objetos soterrados) e variações composicionais na direção vertical conforme ilustrado na Figura 3 (estratigrafia de solos e rochas) (Karim et al., 2019).

Figura 3. Aplicação do método GPR.

Os sistemas de GPR contam com diversos tipos de antenas disponíveis no mercado, as mais usuais são as que apresentam um conjunto de antenas, transmissora e receptora, com a execução de perfis de reflexão, no qual a antena que emite e recebe a onda é transportada ao longo do perfil. Este tipo de aquisição é feita através das reflexões versus o deslocamento da antena, cujo o resultado obtido é apresentado no eixo vertical da imagem as variações das propriedades elétricas em função do tempo (de emissão e recepção da onda), e na posição horizontal o deslocamento da antena (Nunes et al., 2019).

As ondas de rádio empregadas apresentam frequência entre 10 MHz e 2,6 GHz, obtendo informações relacionadas à subsuperfície, através do cálculo da permissividade dielétrica do solo. A penetração depende também do material estudado, podendo variar de 5 a 50 metros, e a resolução da imagem produzida no radargrama, que pode variar de 0,5 a 100 centímetros (Caselle, et al., 2020; Jol e Bristow, 2003).

A facilidade de repetição do método para um mesmo perfil de solo, tanto para a validação de resultados, quanto para a correção de erros que possam ocorrer durante a aquisição, é outro fator de vantagem desta ferramenta não destrutiva, e de fácil execução (Zajícová e Chuman, 2019).

A ferramenta Georadar apresenta seus dados como uma resposta da propagação das ondas eletromagnéticas na forma de imageamento de representação de discontinuidades elétricas, frente a propagação e reflexão das ondas que compõe um Radargrama, no qual é feito uma identificação de padrões representativos destas discontinuidades, na forma de agrupamento de respostas associadas a um padrão de reflexão, correlacionado com o alvo a ser identificado. A técnica é baseada no coeficiente de reflexão da superfície, e não no tempo de transmissão do meio (Slater e Comas, 2009).

No que se refere à investigação da profundidade dos solos, o Georadar já é considerado uma ferramenta com eficiência comprovada. Alguns trabalhos como o de Zhang et al, 2018, que investigou pacotes pedológicos na província de Sichuan, na China, em uma grade com 10 KM de espaçamento entre uma linha e outra, demonstram que o Georadar é capaz de obter com precisão e rapidez a profundidade do solo. Os dados foram associados à geoestatística, sendo indiferentes à topografia do terreno pesquisado, obtendo uma diferença de apenas 3cm em média entre os dados diretos e indiretos.

O solo é constituído por diferentes fases (sólida, líquida e gasosa), características que definem a permissividade dielétrica de um solo, que será proporcional a contribuição de cada uma

destas fases. Salat e Junge (2010) demonstraram uma correlação linear entre a permissividade dielétrica e a densidade de massa seca de um solo, indicando que a permissividade de solos secos depende fortemente de sua porosidade e compactação. Segundo os autores a compactação do solo diminui a porosidade, e consequentemente a fase gasosa do sistema, aumentando a permissividade dielétrica. Com este tipo de informação André et al. (2012), conseguiu identificar camadas de solos compactadas por máquinas agrícolas com o uso do Georadar.

A variação da permissividade dielétrica do solo tem sido objeto de estudo de diversos autores, como Cassidy (2009), que chegou à conclusão que a composição mineral pode afetar diretamente este fator.

Ao se utilizar Georadar para estudos pedológicos deve-se considerar a quantidade de água presente no sistema, pois segundo Annan, 1992, a atenuação do sinal da antena é diretamente proporcional a condutividade elétrica do meio, sendo que a presença de água reduz consideravelmente a faixa real de profundidade alcançada pela onda eletromagnética, efeito semelhante ao provocado pela presença de argila no solo. Mas apesar do efeito citado, De Benedetto et al (2009), não conseguiu um resultado positivo com o uso do Georadar para mensuração de argila presente no solo.

Considerando que o solo é multifásico, a água deste sistema poderá apresentar diferentes composições em camadas distintas. A fase líquida

não apresentará quebras contínuas, mas sim uma variação gradual vertical, um exemplo desta hipótese seria um mesmo sistema pedológico contendo a água capilar e a água adsorvida na região de uma superfície freática. E com variações composicionais diferentes (saturação ou não em alguns elementos como sais e óxidos), tem-se também variações na permissividade da onda (Huang et al, 2013).

O Georadar já foi utilizado até mesmo para investigar a distribuição de cobre (Cu) em solos de países da União Europeia, de forma que Ballabio et al (2018), utilizou-se de Georadar associado a krigagem para mapear a concentração de cobre no solo superficial. O GPR mostrou-se eficiente na previsão da concentração de Cu, especialmente em combinação com a krigagem.

A água é a substância com maior permissividade presente no solo, e quando apresenta alta concentração no meio em questão, poderá influenciar a permissividade de outros materiais, o autor diz que esta característica permite fazer estimativas da quantidade de água presente no solo (Liu B. et al., 2019). Thomas et al. (2006), também constatou que a área superficial específica de solos argilosos é elevada, o que pode acarretar em diminuição da permissividade se o teor de água for elevado neste tipo de solo, e isso quando não houver perdas de condutividade, devido a presença de partículas negativas que favorecem as trocas catiônicas. A relação entre a permissividade e a fração do solo é demonstrado na Figura 4, para um solo com alto teor de caolinita.

$\epsilon - \sigma$ (Textura do solo, temperatura, 1,5 GHz)

Figura 4. Variação da permissividade relativa com o aumento do teor de água em um solo com alto teor de caolinita. Fonte: Thomas et al. (2006).

Chanzy et al (1996), demonstrou que o erro para a determinação da umidade na camada superficial (10 a 20cm), foi de no máximo 0,046 m³/m³. Através da antena de 200 MHz foram mensurados valores de tensão, registrados pelo receptor durante 200 ns. De forma que para análise dos resultados foram verificados traços de solo seco em contraposição aos traços de solo úmido, comparando ondas entre 0 e 10ns com ondas entre 25 e 45 ns, que representam profundidades distintas. Os valores de picos das ondas eletromagnéticas, obtidos entre 65 e 75 MHz, são considerados traços do GPR relacionados a umidade segundo as teorias de Fourier. Como é possível fazer uma estimativa coerente da presença de umidade no solo, outros autores trabalharam com GPR buscando esta finalidade (Ardekani, 2013; Lambot et al., 2008; Minet et al., 2012; Minet et al. 2011; Afshar, et al., 2015; Algeo, et al., 2016; Liu, et al., 2017; Wu, et al., 2019).

Zajícová e Chuman (2019), investigaram métodos para mensurar a quantidade de água no solo a partir do uso de Georadar com base na inversão de forma

da onda. Para isso fizeram análises de velocidades do sinal eletromagnético, das reflexões e do comportamento das ondas, com ênfase nos horizontes orgânicos e detecção de raízes de árvores.

Não existe uma padronização de processamento para Georadar, tendo sido observado que várias metodologias aplicadas corretamente fornecem suporte para variadas inferências em um radargrama. E se levar em consideração, que cada solo, em diferentes latitudes poderá apresentar características particulares que implicam em respostas diferentes no equipamento, necessitando adequar filtros ou ganhos de sinal. O método é amplamente utilizado em pesquisas pedológicas e em áreas subjacentes, e embora não haja uma padronização no processamento, seus resultados podem ser correlacionados a outros métodos para um mapeamento de solos, principalmente para identificação de profundidades.

Tabela 1. Resumo dos estudos de solo que empregaram métodos GPR, organizados por sua aplicação e método.

Aplicação	Método	Estudos
<i>Teor de água no solo</i>	Análise de velocidade a partir do tempo de viagem bidirecional de uma onda refletida por um refletor conhecido	Ercoli et al., 2018; van Overmeeren et al., 1997
	Análise de velocidade por "ponto médio comum"	Greaves et al., 1996; Koyama et al., 2017; Lu et al., 2017; Steelman and Endres, 2012; van Overmeeren et al., 1997
	Velocidade da onda no solo	Ardekani, 2013; Galagedara et al., 2005a, 2005b, 2003; Grote et al., 2003; Huisman et al., 2001; Lu et al., 2017; Pallavi et al., 2010; van Overmeeren et al., 1997
	Velocidade e dispersão da onda guiada	Arcone et al., 2003; Mangel et al., 2015; Rege and Godio, 2012; Strobbia and Cassiani, 2007; van der Kruk et al., 2010, 2006
	Coeficiente de reflexão	Hagrey e Müller, 2000; Ardekani, 2013; Reppert et al., 2000
	Análises de sinais adiantados	Algeo et al., 2016; Benedetto, 2010; Comite et al., 2016, 2014; Di Matteo et al., 2013; Ferrara et al., 2013; Pettinelli et al., 2014, 2007
	Inversão completa da onda	Ardekani et al., 2014a; Ardekani, 2013; Lambot et al., 2008, 2006, 2004, Minet et al., 2012, 2011; Mourmeaux et al., 2014; Tran et al., 2015; Weihermüller et al., 2007
	Outras modelagens aproximadas envolvendo inversão da forma da onda	Ardekani et al., 2014a; Ardekani, 2013; Lambot et al., 2008, 2006, 2004, Minet et al., 2012, 2011; Mourmeaux et al., 2014; Tran et al., 2015; Weihermüller et al., 2007
<i>Salinidade do solo</i>	Coeficiente de reflexão	Hagrey and Müller, 2000
<i>Textura do solo</i>	Análise do sinal antecipado	Benedetto and Tosti, 2013; Meadows et al., 2006; Tosti et al., 2013
	Abordagens de modelagem por inversão de formas de onda	Busch et al., 2014
<i>Estratigrafia do perfil do Solo</i>	Imagens de reflexão	André et al., 2012; Nováková et al., 2013; Simeoni et al., 2009; Zhang et al., 2014
	Abordagens de modelagem por inversão de formas de onda	Buchner et al., 2012
<i>Estimativa da Espessura de horizontes orgânicos</i>	Imagem de reflexão	Li et al., 2015; Winkelbauer et al., 2011
	Inversão completa da onda	André et al., 2016, 2015, 2014
<i>Estratigrafia de turfeiras</i>	Imagem de reflexão	Comas et al., 2017, 2015; Fyfe et al., 2014; Karuss and Berzins, 2015; Kettridge et al., 2012, 2008; Laamrani et al., 2013; Parry et al., 2014; Parsekian et al., 2012a; Parsekian et al., 2012b; Plado et al., 2011; Proulx-McInnis et al., 2013; Rosa et al., 2009; Sass et al., 2010; Slater and Reeve, 2002; Walter et al., 2016
<i>Gases biogênicos em turfeiras</i>	Imagem de reflexão	Comas et al., 2008, 2005; William and Comas, 2016
	Análises da velocidade do sinal	Chen and Slater, 2015; Parsekian et al., 2012a; Strack and Mierau, 2010
	Análises espectrais da frequência do sinal	Terry and Slater, 2017
<i>Raízes e sistema radicular</i>	Imagem de reflexão	Borden et al., 2016; Freeland, 2015; Guo et al., 2013b; Hirano et al., 2009; Li et al., 2016; Q. Liu et al., 2018; Raz-Yaseef et al., 2013; Rodríguez-Robles et al., 2017; Tanikawa et al., 2013; Tardío et al., 2016; Wu et al., 2014; Yeung et al., 2016
<i>Diâmetros de raiz e biomassa</i>	Índices extraídos da força do sinal ou da forma de onda	Barton and Montagu, 2004; Borden et al., 2014; Cui et al., 2011; Hirano et al., 2009; Q. Liu et al., 2018; X. Liu et al., 2018; Rodríguez-Robles et al., 2017; Simms et al., 2017; Stover et al., 2016; Zhu et al., 2014

Fonte: Zajícová e Chuman (2019).

Espectrorradiometria

A radiometria é a ciência que estuda a medição da energia radiante eletromagnética, ou seja, a interação da radiação com um alvo pode ser mensurada e quantificada/qualificada por técnicas de radiometria. As quantidades de energia envolvidas são denominadas grandezas radiométricas, podendo ser mensuradas em campo ou laboratório, através de radiômetros. Entre as grandezas quantificadas no processo, a principal é a energia radiante (Q), a partir do qual são derivadas as demais grandezas, como: radiância

(L), irradiância (E), fluxo radiante (f), exitância (M), intensidade radiante (I) (Steffen e Moraes, 1993) (Carney e Johnston, 2016).

Quando a energia radiante, ou qualquer outra relacionada a ela, é mensurada em termos de seus componentes monocromáticos, torna-se uma função do comprimento de onda. Portanto, as

designações para essas quantidades devem ser precedidas do adjetivo “espectral”, por exemplo como no uso do termo “irradiação espectral”.

Considerando que a radiometria envolve a medição da energia radiante total emitida pela fonte radiante sobre todo o espectro óptico (1 nm a 1000 μm), e que a espectrorradiometria está relacionada com o conteúdo espectral da fonte radiante, medidas radiométricas realizadas a partir de espectrorradiômetros portáteis ou mantidos em ambiente controlado (laboratórios), operam em faixas espectrais estreitas e numerosas (Figura 5).

A radiometria permite a caracterização espectral de objetos e a condução de experimentos visando a calibração absoluta de sensores remotos. esta característica a diferencia da fotometria que se refere apenas à porção do espectro óptico a que o olho humano é sensível (380 nm a 780 nm) (Price et al., 2019).

Figura 5. Esquema ilustrando a espectrorradiometria. Fonte: Meneses, 2001.

Pesquisadores de várias partes do mundo têm estimado diversas propriedades do solo como pH, condutividade elétrica, carbono orgânico, argila, silte, areia, soma de bases, capacidade de troca de cátions, ferro total, além de características de fertilidade como ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), utilizando-se de ondas, cuja a faixa espectral variam entre o visível, o infravermelho próximo e o infravermelho médio, apresentando resultados com diversos graus de confiabilidade (Ben-Dor & Banin, 1995; Stenberg et al., 2002; Islam et al., 2004; Nanni e Demattê, 2006; Brown et al., 2006; Demattê et al., 2017; Lamine et al., 2019; Cezar et al., 2019; Rodrigues et al, 2019).

O método tem sido utilizado frequentemente em pesquisas voltadas para estudos pedológicos, a exemplo dos trabalhos de Demattê e Nanni (2003), Chang et al. (2001), Shepherd e Walsh (2002), Daniel et al. (2003), Stenberg et al. (2010), e Cezar et al. (2013) foram utilizados métodos estatísticos como regressão linear múltipla, mínimo quadrado, regressão multivariada splines, e redes neurais, para relacionar o espectro com os atributos do solo.

A quantificação de atributos do solo estudados por meio de sua curva espectral é baseada em suas características que envolvem a absorção de energia eletromagnética em níveis ou em intervalos específicos da curva, uma vez que, diferentes quantidades de determinados elementos presentes no solo podem aumentar ou diminuir a

reflectância espectral em comprimentos de onda específicos do espectro eletromagnético (Nanni, 2000). Para Rodrigues et al. (2019), o uso da espectrorradiometria para determinar as propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo mostrou resultados favoráveis quando investigado na região espectral visível (VIS: 400-700 nm).

Segundo Price (1994), é esperado que uma única assinatura espectral permita a identificação da maioria dos tipos de superfície de rochas, solos e vegetação, desde que a resolução espacial dos dados seja suficiente para representar um único tipo de superfície para cada espectro, porém a mistura espectral cria uma complicação de dados, de modo que é necessário explorar a possibilidade de identificar componentes individuais dentro do sinal misto, provenientes de vários tipos de superfície. Como é sugerido pelo autor pode-se distinguir alguns elementos facilmente, no entanto existem casos nos quais os espectros apresentam muitas similaridades em todos os comprimentos de ondas. Para melhor discriminação destes espectros faz-se necessário uma comparação no campo quantitativo, para tal deve-se estabelecer uma métrica que descreva a diferença entre os espectros.

Para Cathcart et al., (2004), processos naturais, como intemperismo, precipitação, infiltração de água, etc, darão origem a mudanças

nas características de assinatura para solos e seus constituintes individuais. Portanto é importante entender a origem e o impacto dos processos naturais e artificiais nas características de assinatura subjacentes, a fim de definir precisamente as condições e restrições sob as quais a detecção dessas atividades feitas pelo homem pode afetar a resposta espectral.

Selige et al. (2006) diz que a criação de bibliotecas espectrais, teria como finalidade a utilização de dados em sensoriamento remoto como medições de radiância ou refletância in situ para a calibração e / ou seleção de membros finais no processamento de dados adicionais. Uma outra possibilidade para emprego destas medições seria para avaliação laboratorial rápida por espectroscopia de reflectância difusa (DRS) através das propriedades do solo (Viscarra Rossel et al. 2006; Brown 2007).

Viscarra Rossel (2008), começou a elaborar uma biblioteca global de espectros de solos, que recebeu várias atualizações, e até 2016 já havia mais de 23.600 respostas espectrais de solos de 12.509 localizações diferentes conforme está ilustrado na Figura 6 (Viscarra Rossel et al., 2016).

Figura 6. Localizações dos 12.509 pontos de resposta espectral que estão no banco de dados global. Fonte: Viscarra Rossel, 2016.

Nas últimas décadas, os trabalhos envolvendo espectrorradiometria para o mapeamento digital de solos tem se multiplicado.

O trabalho de Brodský et al. (2011) se propôs a construir uma biblioteca espectral de solos Checos. Segundo o autor, esta biblioteca deve conter um

banco de dados e metadados que armazena as informações auxiliares correspondentes dos solos, como tipo de material (solo, material parental), preparação da amostra, localização da amostra com coordenadas geográficas, classificação do solo, características morfológicas, medições laboratoriais do solo, propriedades biológicas, químicas, físicas e potenciais, características geofísicas além de informações climatológicas sobre a localização da amostra.

O Brasil possui uma biblioteca com mais de 39 mil amostras (Figura 7) doadas por 65

colaboradores representando 41 instituições dos 26 Estados brasileiros e do DF, esta equipe de pesquisa é conduzida pelo Dr. Demattê da Universidade de São Paulo. A equipe recebe vários tipos de amostras classificadas como amostras simples, amostras em profundidade coletada por gradagem; amostras por horizontes de perfis completos. Todas as amostras recebidas são catalogadas, e padronizamos no sensor Fieldspec, em seguida são analisados os espectros e catalogados. Por fim as amostras são indexadas ao banco de dados disponível na Biblioteca Espectral de Solos do Brasil (BESB).

Figura 7. Locais de amostragem da Biblioteca Espectral do Solo do Brasil. Fonte: Demattê et al, 2019.

Comportamento Espectral do Solo

A reflectância do solo é uma propriedade derivada do somatório de diversos fatores que apresentarão o comportamento ou assinatura espectral. Os fatores mencionados incluem combinação heterogênea de componentes como tamanho de partícula, estrutura do solo, rugosidade superficial, umidade, teor de matéria orgânica, teor de minerais carbonatados, presença ou não de quartzo e dos óxidos de Fe (Stoner e Baumgardner, 1981), dentre outros fatores.

Formaggio et al. (1996), demonstraram a possibilidade de caracterizar os

solos através de sensores remotos trabalhando-se com dados de campo e laboratório, demonstrando que os agrupamentos das classes de solos pesquisados não obedeceram às mesmas compartimentações estabelecidas pelo sistema de classificação taxonômica de solos, segundo o critério de comportamento espectral.

Segundo Condit (1970), as curvas espectrais dos solos podem ser tipificadas em 5 classes, organizando faixas espectrais que facilitaram os estudos de propriedades do solo de acordo com a região do espectro:

Tabela 2. Principais características das curvas espectrais de solos. Fonte: Condit, 1970. Adaptada por Moraes, 2010.

Tipo de Curva	Região do Espectro	Feição Espectral	Característica do Solo
1	0,32 – 1,00 μm	Baixa Reflectância Forma Côncava	
2	0,32 – 0,60 μm 0,60 – 0,70 μm 0,70 – 0,74 μm 0,32 – 0,75 μm	Gradiente Decrescente Gradiente Acentuado Gradiente Decrescente Forma Convexa	Solos bem drenados pouca matéria orgânica
3	0,32 – 0,60 μm 0,60 – 0,74 μm 0,76 – 0,78 μm 0,88 – 1,00 μm	Gradiente Acentuado Gradiente Pequeno Gradiente Decrescente Gradiente Aumenta c/d	Solos com conteúdo de ferro razoavelmente elevado
4	0,32 – 2,30 μm 0,88 – 1,30 μm	Baixa Refletância Redução da Reflectância	Alto conteúdo de ferro e matéria orgânica
5	0,75 – 1,30 μm	Gradiente Decrescente Não há Banda de Absorção de Água em 1,45 μm	Alto conteúdo de ferro e baixo conteúdo de matéria orgânica

Nos trabalhos de Stoner & Baumgardner (1981), foram caracterizados outros dois padrões de curvas espectrais, complementando a tabela 2 de Condit (1970), estes dados juntamente com os dados produzidos por Fromaggio et al. (1996), foram organizados em gráficos (Figura 8), e

comparados a solos estudados por Demattê (1992). Desde então, outros trabalhos posteriores tentaram estabelecer relação entre os atributos do solo e a energia refletida, como os de Coleman & Montgomery (1991) e Henderson et al. (1992).

Figura 8. Determinação de ângulos, avaliações de concavidade, banda e dados simulados de curvas espectrais dos solos estudados por Demattê, comparados com as curvas espectrais dos tipos de solo classificados por Stoner & Baumgardner (1981) e Formaggio et al. (1996). Fonte: Demattê, 2002.

O sensoriamento remoto tangencia a refletância, com uma série de operações matemáticas, cujo a finalidade é a produção de imagens que evidencie o alvo ou o objeto de

estudo. Para tal fim, as operações utilizadas são soma ou adição, subtração, multiplicação e divisão entre bandas, com destaque para a última, quando se deseja realçar uma feição ou alvo em uma

operação não-linear, pois a divisão entre bandas realça uma assinatura espectral em detrimento da outra, permitindo a caracterização de algumas curvas (Nanni e Demattê, 2006).

Para se compreender as variações de dados espectrais em nível orbital, é necessário conhecer os solos através da radiometria em laboratório, que reflete a realidade mais próxima do objeto de estudo (Demattê, 1999). Este tipo de pesquisa não é recente, Epiphanyo (1983) verificou os efeitos que a rugosidade de uma superfície e os ângulos de exposição apresentavam sobre a curva espectral do solo, em diversas condições de umidade. Valeriano et al. (1995) estudou o fator de refletância bidirecional em 14 classes de solo no Brasil. Já Meneses e Madeira Neto (2001), realizou estudos do comportamento espectral voltados para o tamanho da partícula.

Existem variadas limitações impostas pelos sensores, as principais estão relacionadas ao número de bandas e a sua largura espectral. Alguns materiais pedológicos poderão ser diferenciados ou identificados caso a largura das bandas espectrais dos sensores imageadores sejam suficientemente estreitas da ordem de 10 nm, que é mais ou menos a largura média das bandas de absorção (Lima, 2011). Embora as regiões espectrais de todo o VIS (350–800 nm), NIR (800–1100 nm), SWIR (1100–2500 nm) possam ser usadas para calibrar modelos para quantificação, a maioria das regiões indesejadas que não contêm informações relevantes relacionados ao atributo de interesse podem gerar ruído nos modelos e aumentar o processamento computacional (Dematte et al 2017).

Radiometria

Kingsley e Quegan (1999), afirmam que radar é tudo o que usa ondas de rádio para detectar a presença de objetos e encontrar sua posição. O termo radar tem sido amplamente aplicado para descrever sistemas que operam na faixa de frequência de micro-ondas, o que o torna um sistema ativo, que ao emitir a onda, esta interage com a superfície, com sinais eletromagnéticos, de forma que o sensor mede o sinal refletido. Neste sistema são empregadas ondas que vão de 1mm à 1m de comprimento, coincidindo com as ondas utilizadas nos sistemas de comunicação (Ulaby et al., 1981).

Segundo Massonnet et al. (1998), as aplicações geofísicas de interferometria de radar para medir mudanças na superfície da Terra explodiram no início dos anos 90. Mas já entre 1981 e 1984, aconteceram as missões do ônibus espacial colômbia para coleta de dados SAR, nas bandas L, C e X. E a partir da década de 90, vários satélites começaram a fornecer cobertura radar da superfície terrestre, dentre eles, o Radarsat, JERS e ERS.

Os dois tipos de radar mais usuais são os aerotransportados de visada lateral (side-looking airborne radar – SLAR) e os de abertura sintética (Synthetic Aperture Radar – SAR). No primeiro caso, uma antena fixa é a uma plataforma móvel, sendo as ondas propagadas a partir desta fonte. A direção de visada é lateral, em relação à direção de voo da aeronave. Em radares de abertura sintética, uma antena longa virtual é formada através do registro sequencial de amplitudes e fases do sinal retroespalhado por uma antena de dimensões reduzidas (Freneau et al, 1996). E segundo Mura (2000), a aeronave que transporta esta antena deve se deslocar a uma velocidade constante, no qual um emissor envia pulsos de micro-ondas modulados linearmente em frequência, com intervalos regulares.

O SAR mantém a fase e a magnitude do sinal retroespalhado pela superfície imageada, com intuito de aumentar a resolução espacial, sem que seja necessário aumentar o tamanho físico da antena (Figura 9). Ele surgiu por conta da limitação na capacidade de produzir resoluções fina o suficiente para a maioria das aplicações de sensoriamento remoto, pois o transporte de antenas longas é difícil, e aumentaria o custo da aquisição de dados.

O satélite Daichi foi lançado em órbita polar, há uma altura de 691,25 Km, em 24 de janeiro de 2006, portando três sensores de alta resolução, sendo um deles o Radar de Abertura Sintética de Banda L com Estrutura Faseada (PALSAR), de forma que o esperado é que este sensor fosse capaz de monitorar o desmatamento, estimar a biomassa e medir a deformação usando interferometria e diferenciação de amplitude, devido ao maior poder de penetração de sinal do SAR (Radar de Abertura Sintética) através da cobertura vegetal. O PALSAR exige mais tempo de processamento devido ao tempo de azimuth mais

longo resultante do sinal da banda L (Shimada et al, 2009).

Figura 9. Esquema de aquisição de dados através de antenas do tipo SAR. Fonte: Agência de Exploração Aeroespacial do Japão, 2014.

A interpretação de imagens SAR baseia-se principalmente nas diferenças entre as propriedades dielétricas, como a presença de água no meio em questão, pois ao operar em faixas espectrais centimétricas, abre possibilidade de se obter imagens de uma área, independente de nebulosidade ou de iluminação natural (Henderson e Lewis, 1998). No Brasil o sistema de radar que adquiriu um dos maiores volumes de dados de radar no período 2006-2011 foi o Advanced Land Observing Satellite Phased Array L-band Synthetic

Aperture Radar (ALOS PALSAR), operando em uma faixa de 23 cm de comprimento, sendo conhecida como banda L (Igarashi, 2001), e a partir de 2013 deu lugar ao ALOS 2. Quanto maior o comprimento de onda, maior a capacidade de penetração dos sinais de radar no dossel ou em solos. Não existe uma banda espectral que seja melhor ou pior, dependendo do tipo de aplicação (Jensen, 2009).

Tabela 3. Principais comprimentos de onda e frequências utilizados pelos sistemas de Radar.

Banda	Comprimento de onda (cm)	Frequência (GHz)
Ku	1,67 – 2,24	18,0 – 12,5
X	2,24 – 3,38	12,5 – 8,0
C	3,9 – 7,75	8,0 – 4,0
S	7,75 – 15,0	4,0 – 2,0
L	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
P	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

Fonte: Jensen (2009).

Integração entre GPR e SAR

As abordagens de migração entre dados GPR e SAR são baseadas em equações de onda, aplicadas para objetos previamente conhecidos e enterrados. Estas equações têm sido amplamente utilizadas com sucesso no processamento de sinais sísmicos para exploração de petróleo por décadas (Gu et al., 2003).

Ao levar em consideração que os dois métodos se utilizam de ondas eletromagnéticas, alguns autores como Nazli e Sezgin (2011), trabalharam com GPR para transformar os dados obtidos em uma Imagem SAR. Através transformação inversa de Fourier 2D, os dados de domínio de tempo coletados em diversos pontos de observação foram transformados em domínio espectral 2D, através de dois algoritmos: radar de abertura sintética Strip-map e métodos de subtração de fundo para dados GPR A-scan. Os resultados foram satisfatórios para o método SAR, que oferece melhor foco sobre a assinatura do alvo do que o método de subtração do sinal A-scan. Em um trabalho semelhante Baer et al. (2017), realizou uma integração entre as técnicas de Radar de Penetração no Solo (GPR) e Radar de Abertura Sintética (SAR), verificando a reflexão da superfície do solo e a propagação da onda no solo. Aplicando o princípio de Fermat e o operador Sober, foi feita uma otimização da imagem SAR dos dados GPR, enquanto a permissividade do solo foi estimada.

Mas para Baer et al. (2017), a combinação de técnicas comuns de GPR e SAR não é direta, devido ao comportamento diversificado de propagação das ondas eletromagnéticas no espaço livre e no solo, pois as diferentes velocidades de propagação, bem como os efeitos de reflexão na superfície do solo, influenciam os algoritmos de SAR negativamente. Negligenciar a permissividade do solo poderá causar uma superposição errônea das fases, fazendo com que as imagens de SAR pareçam borradas. Estudos semelhantes foram realizados por Gonzalez-Valdes et al. (2013), conseguindo caracterizar a rugosidade da superfície.

Em trabalhos posteriores de aplicação, foram realizados monitoramentos de zonas úmidas dentro do canal de uma usina hidrelétrica usando Radar de Abertura Sintética (SAR) e dados de radar de penetração no solo (GPR). O monitoramento baseado em SAR considerou a estimativa de umidade do solo e a detecção de umidade causada por vazamentos, utilizando descritores de Fourier, enquanto a interpretação automática de dados baseada em GPR usou descritores de Fourier para detectar potenciais zonas úmidas dentro do canal. A partir dos dados obtidos foram comparados os momentos espectrais, os resultados mostraram que os dados de SAR podem ser usados para detectar vazamentos de água quando a superfície já está úmida, enquanto os dados GPR, obtidos no topo e nas laterais do canal, podem ser usados para determinar possíveis vazamento de água dentro do canal (Gleich, 2013).

Grandjean et al. (2003), fez um abordagem baseada na integração entre duas técnicas o Radar de Abertura Sintética aerotransportada (SAR) na frequência da banda L (1,2 GHz), capaz de produzir imagens de estruturas subsuperficiais de grande escala, e o Radar de Penetração no Solo (GPR) usado entre 500 e 900 MHz para sondar solos em escala local, da superfície até vários metros de profundidade. Este trabalho visou identificar paleodunas e paleossolos, no Egito e França, com a possibilidade de mapear grandes estruturas como estratificações cruzadas, devido ao ambiente de deposição. A profundidade de penetração do SAR é estimada invertendo um modelo de espalhamento simples, permitindo diagnosticar propriedades geométricas em subsuperfície, e as propriedades dielétricas foram determinadas pela análise de dados GPR. Com a combinação das técnicas foi possível detectar estruturas, além da profundidade de pacotes espessos de solo.

No trabalho de Grandjean et al. (2003), ele optou por realizar um perfil de 400 m de distância e 2,5m de largura, nos modos GPR e SAR, com incidência de 0° a 45° e abertura de 45° a 2°, cuja as respostas dielétricas para os modelos estão na Figura 10.

Figura 10. As curvas superior e inferior referem-se, respectivamente, às potências GPR e SAR. Fonte: Grandjean et al., 2003.

Conclusão

Todas as citadas técnicas apresentam potencial para obtenção de informações pedológicas, mas necessitam do processamento adequado para se chegar a um resultado satisfatório. Da etapa de aquisição até o produto final (mapa), muitos passos podem interferir negativa ou positivamente. Uma má calibração de um equipamento, levar em consideração fatores irrelevantes ou uma aquisição mal elaborada podem interferir diretamente no resultado. Da mesma forma o uso correto dos equipamentos e processamentos adequados geram produtos mais próximos da realidade.

O mapeamento digital de solos pode ser integrado ou utilizar dados de outros métodos, de forma que esta ferramenta está em constante evolução, a sua base de dados internacional é extensa e continua se expandindo.

O mapeamento digital envolvendo métodos como SIG e sensoriamento remoto com uso de imagens de radar, tem gerado mapas com maior precisão. Mas ainda se faz necessária a confirmação de dados através da coleta de amostras em campo, descrição de perfis de solos e a análise de amostras em laboratório, pois a confirmação e calibração de equipamentos dependem de informações diretas, que apenas podem ser obtidas em campo.

Ferramentas como o Georadar e imagem de radar tem demonstrado um grande potencial para integrar o mapeamento de solos pois apresentam baixo custo e eficiência na aquisição de dados com baixa margem de erro. E, devido ao fato destas tecnologias empregarem ondas eletromagnética em

diversos comprimento, podem ser ajustadas para diferentes realidades.

A espectrorradiometria é um dado de baixo custo, fácil e rápida aquisição, e embora as composições pedológicas sejam multifásicas, a resposta espectral para cada elemento isoladamente não varia, permitindo uma parametrização de composições semelhantes. A base de dados construída através da ferramenta fornece suporte para que pesquisadores possam fazer análises comparativas em qualquer parte do mundo.

O SAR é outra ferramenta com potencial de crescimento, pois com o avanço do poder de processamento dos computadores atuais, o método tem crescido cada vez mais, e a principal vantagem é a capacidade de penetração da onda de radar através da nebulosidade e da vegetação.

O mapeamento pedológico tem evoluído por conta do número crescente de ferramentas que dão suporte a esta ciência, mas a construção de um mapa que se aproxime da realidade vai depender da habilidade do pesquisador em escolher o (s) método (s) mais adequado a cada realidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNB (Universidade de Brasília) que forneceu uma estrutura adequada para a realização da pesquisa, além da Capes, ICMBIO e CECAP, que tem trabalhado em parceria com os autores via Laboratório de Geografia Física da UNB, para a realização de diversos trabalhos.

Referências

- Afshar, A., Abedi, M., Norouzi, G.H., Riahi, M.-A. 2015. Geophysical Investigation of Underground Water Content Zones Using Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar: A Case Study in Hesarak-Karaj, Iran. *Engineering Geology*, 196, 183-193. Disponível: doi: 10.1016 / j.enggeo.2015.07.022 Acesso: 08 jun. 2019.
- Algeo, J., Van Dam, R. L., Slater, L. 2016. GPR pre-coke: Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content During Irrigation in Clay Soils.. *Vadose Zone Journal*, 15 (11), 0. Disponível: doi: 10.2136 / vzj2016.03.0026. Acesso: 08 jun. 2019
- Annan Ap. 1992. Ground penetration radar workshop notes. *Sensors & Software*, Mississauga. Retrieved from.
- Ardekani, M. R. 2013. Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping. *Geoderma*. 201, 55-66. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010>. Acesso: 08 jun. 2019
- Arrouays, D. 2017. LAGACHERIE, P., HARTEMINK, A.E. Digital soil mapping across the globe. *Geoderma Regional*, 9, 1-4,
- Baer, C., Gutierrez, S., Jebramcik, J., Barowski, J., Vega, F., Rolfes, I. 2017. Ground penetrating synthetic aperture radar imaging providing soil permittivity estimation. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, p. 1367-1370,
- Ballabio, C., Panagos, P., Lugato, E., Huang, J.H., Orgiazzi, A., Jones, A., Fernandez-Ugalde, O., Borrelli, P., Montanarella, L. 2018. Copper distribution in European topsoils: an assessment based on LUCAS soil survey. *Sci. Total Environ.* 636, 282-298.
- Ben-Dor, E., Banin, A. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 364-372.
- Biswas, A., Zhang, Y. 2018. Sampling Designs for Validating Digital Soil Maps: A Review. *Pedosphere*, v. 28, 1, 1-15.
- Borecka, A., Herzig, J., Durjasz-Rybacka, M. 2015. Ground Penetrating Radar Investigations of Landslides: A Case Study in a Landslide in Radziszów. *Studia Geotechnica et Mechanica*, v. 37, n. 3, p. 11-18 DOI: 10.1515/sgem- 2015-0028. Acesso: 13 jul. 2019
- Brodský, L., Klement A., Penížek V., Kodešová R., Boruvka L. 2011. Building soil spectral library of the czech soils for quantitative digital soil mapping. *Soil and Water Research*. 6, 165-172,
- Brown, D.J. 2007. Using a global VNIR soil-spectral library for local soil characterization and landscape modeling in a 2nd-order Uganda watershed. *Geoderma*, 140, 444-453.
- Brown, D. J., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., Mays, M. D., Reinsch, T. G. 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 132, 273-290.
- Carney, M. N., Johnston, W. M. 2016. A novel regression model from RGB image data to spectroradiometric correlates optimized for tooth colored shades. *JOURNAL OF DENTISTRY*. 51, 45-48.
- Caselle, C., Bonetto, S., Comina, C., & Stocco, S. 2020. GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95, 103-137 Disponível: doi:10.1016/j.tust.2019.103137. Acesso: 14 jul. 2019
- Cathcart, J. M., Campbell R., Greenwood S., Bock R. D., Mauro B. 2004. Impact of soil and environmental processes on hyperspectral infrared signatures. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IX*. 5415, 638-647.
- Caten, A. Ten, Dalmolin R. S. D., Mendonça-Santos M De L, Giasson E. 2012. Mapeamento digital de classes de solos : características da abordagem brasileira. *Ciência Rural*. Santa Maria, 42, 1989-1997.
- Cezar, E., Nanni, M., Demattê, J., Chicati, M., Berti, R. 2013. Estimativa de atributos do solo por meio de espectrorradiometria difusa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 37, 858-868, [Fecha de consulta: 16 de junho de 2019]. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180228128004>. Acesso: 13 jul. 2019
- Cezar, E., Nanni, M. R., Guerrero, C., Da Silva Junior, C. A., Cruciol, L. G. T., Chicati, M. L., & Silva, G. F. C. 2019. Organic matter and sand estimates by spectroradiometry: Strategies for

- the development of models with applicability at a local scale. *Geoderma*. 340, 224-233. Disponível: doi:10.1016/j.geoderma.2019.01.021. Acesso: 13 jul. 2019
- Chang, C., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh Junior, C. R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy - principal components regression analyses of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:480-490,
- Chanzy A., Tarussov A., Judge A., Bonn F. 1996. Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1318–1326.
- Coleman, T. L., Montgomery, O.L. 1987. Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. *Photogr. Eng. Remote Sens.*, 53, 1659-1663,
- Daniel, K.W., Tripathi, N.K., Honda, K. 2003. Artificial neural network analysis of laboratory and in situ spectra for the estimation of macronutrients. In: *Soils of Lop Buri (Thailand)*. *Aust. J. Soil Res.*, 41:47-59,
- De Benedetto, D., Castrignanò, A., Sollitto, D., Modugno, F. 2010. Spatial relationship between clay content and geophysical data. *Clay Minerals* 45 (2) 197-207.
- Demattê, J. A. M., Ramirez-Lopez, L., Marques, K. P. P., & Rodella, A. A. 2017. Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy. *Geoderma*. 288, 8-22. Disponível: doi:10.1016/j.geoderma.2016.11.013 Acesso: 14 jul. 2019
- Demattê, J. A. M., Alves, M. R. , Terra, F. D. S., Bosquilia, R. W. D., Fongaro, C.T., Barros, P. P. D. S. 2016. É possível classificar a textura do solo usando um sensor localizado a 800 km da superfície? *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Disponível: DOI: http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20150335. Acesso: 21 mar. 2019
- Demattê, J. A. M., Dotto, A. C., Paiva, A. F. S., Sato, M. V., Dalmolin, R. S. D., De Araújo, M. Do S. B., Elisângela B. Da Silva, Nanni, M. R., Caten, A. Ten, Noronha, N. C., Lacerda, M. P. C., José Coelho De Araújo Filho, Rodnei Rizzo, Bellinaso H., Francelino, M. R., Schaefer, C. E. G. R., Luiz E. Vicente, Uemeson J. Dos Santos, Sampaio, E. V. S. B., Menezes, R. S. C., Souza, J. J. L. L. De, Abrahão, W. A. P., Coelho, R. M., Grego, C. R., Lani, J. L., Fernandes, A. R., Gonçalves, D. A. M., Silva, S. H. G., Menezes, M. D. De, Curi, N., Couto, E. G., Anjos, L. H. C., Ceddia, M. B., Pinheiro, É. F. M., Grunwald S., Vasques, G. M., Marques. J. J., Silva, A. J. Da, Barreto, M. C. V., Nóbrega, G. N., Souza, M. Z. Da Silva, Sara F. De, Valladares, G. S., Viana, J. H. M., Terra, F. S., Horák-Terra, I., Fiorio, P. R., Silva, R. C., Frade, E. F. Júnior, Lima R. H. C., Alba, J. M. F., Souza, V. S. De Junior, Brefi, L. M. S., Ruivo M. L. P., Ferreira, T. O., Brait, M. A., Caetano, N. R., Brighenti I., Mendes, W. S., Safanelli, J. L., Guimarães, C. C. B., Poppiel, R. R., Souza, A. B., Quesada, C. A., Couto, H. T. Z. 2019. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. *Geoderma*. 354, 1-21.
- Epiphanyo, J. C. N. 1983. Efeito do ângulo de observação e da rugosidade superficial no comportamento espectral de solos sob condições hídricas temporalmente variáveis. São Jose dos Campos: INPE, 52 p.
- Epiphanyo, J.C.N., Formaggio, A. R., Valeriano, M.M., Oliveira, J. B. 1992. Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo. São José dos Campos: INPE, 131p. (INPE-5424-PRP-172).
- Formaggio, A.R., Epiphanyo, J. C. N., Valeriano, M.M., Oliveira, J. B. 1996. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.467-474,
- Fruneau B., Achache, J., Delacourt, C. 1996. "Observation and modeling of the SaintEtienne-de-Tinee landslide using SAR interferometry". *Tectophysics* 265, pp. 181– 190.
- Gleich, D. 2013. Detection of wet zones within a hydro-power plant's canal using SAR and GPR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 6, n. 4, p. 1864–1878,
- Gonzalez-Valdes, B., Martinez-Lorenzo, J. A., Rappaport, C. M. 2013. Dual band SAR processing for low dielectric contrast buried IED detection. *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, p. 1080–1081.

- Gu, K., Wang, G., Li, J. 2003. Migration Based SAR Imaging for Ground Penetrating Radar Systems. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery X. doi:10.1117/12.487135
- Harrison, L., Michalsky, J., Berndt, J. 1994. "Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements," Appl. Opt. 33(22), 5118-5125.
- Hartemink, A. E. 2016. The definition of soil since the early 1800s. Advances in Agronomy. 137, 73-126. Disponível doi:10.1016/bs.agron.2015.12.001 Acesso: 21 mar. 2019
- Henderson, F. M., Lewis, A. J. 1998. Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing, Nova Iorque: John Wiley & Sons, 3a ed., v. 2, 866 p.
- Igarashi, T. 2001. ALOS mission requirements and specifications. Advances in Space Research. 28, 127-131.
- Islam, K., Singh, B., Schwenke, G., Mcbratney, A. 2004. Evaluation of vertosol soil fertility using ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy. Sydney. Proceedings... Sydney, University of Sydney. In: SUPERSOIL, 3. 2004, 5-9.
- Jensen, J. R. 2009. Sensoriamento Remoto do Ambiente. Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução: José Carlos Neves Epiphânio et al. São José dos Campos – SP. Ed Parentese, 585 p.
- Jol, H., Bristow, C., 2003. GPR in sediments: Advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. Geological Society Special Publication, 211 pp. 9-27. 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.02.
- Karim, M. N. A., Jamlos, M. A., Ibrahim, S. Z., Jamlos, M. F., Lee, Y. S. 2019. Geological Effect on GPR System Due to Soil Properties in Malaysia. International Journal Of Integrated Engineering. 11, 313-320.
- Kingsley, S., Quegan, S. 1999. Understanding Radar Systems, SciTech Publishing, Raleigh, NC,
- Khosravi, M.R., Samadi, S. 2019. Data compression in ViSAR sensor networks using non-linear adaptive weighting. J Wireless Com Network, vol: 2019, Nº 264 doi:10.1186/s13638-019-1577-z
- Lagacherie, P., Mcbratney, A.B., Voltz, M. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P. et al. (Ed.). Digital soil mapping: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007. p.3-24.
- Lambot, S., Slob, E., Chavarro, D., Lubczynski, M., Vereecken, H. 2008. Measuring soil surface water content in irrigated areas of southern Tunisia using full-waveform inversion of proximal GPR data. NEAR Surf. Geophys. 6, 403-410.
- Lamine, S., Petropoulos, G., Brewer, P., Bachari, N. E. I., Srivastava, P., Manevski, K., Kalaitzidis, C., Macklin, M. 2019. Heavy Metal Soil Contamination Detection Using Combined Geochemistry and Field Spectroradiometry in the United Kingdom. Sensors. Vol: 19(4), 762. Disponível: doi:10.3390/s19040762 Acesso: 02 Abr. 2019
- Liu, B., Ren, Y., Liu, H., Xu, H., Wang, Z., Cohn, A. G., Jiang, P. 2019. Deep Learning-Based Ground Penetrating Radar Data Inversion for Tunnel Lining. IEEE. 2, 1-15.
- Liu, X. B., Chen, J., Cui, X. H., Liu, Q. X., Cao, X., Chen, X. H. 2017. Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: a review of current methods. INTERNATIONAL JOURNAL OF DIGITAL EARTH. 12, 95-118 Disponível: DOI: 10.1080/17538947.2017.1412520. Acesso: 05 Abr. 2019
- Lima, S. F. S. 2011. Iniciação em sensoriamento remoto. Educar em Revista. 40, 225–227.
- Mcbratney, A.B., Mendonça Santos, Mdl, Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. Geoderma. 117, 3–52.
- Meneses, P. R., Madeira Netto, J. S. 2001. orgs. Sensoriamento remoto: Reflectância dos alvos naturais. Brasília, UnB/Embrapa Cerrados, 262p.
- Minasny, B., Mcbratney, A. B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. Geoderma, 264, 301-11.
- Minet, J., Wahyudi, A., Bogaert, P., Vanclooster, M., Lambot, S. 2011. Mapping shallow soil

- moisture profiles at the field scale using full-waveform inversion of ground penetrating radar data. *Geoderma*. Vol 161, P. 225–237. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.023>. Acesso: 03 Mar. 2019.
- Minet, J., Bogaert, P., Vanclooster, M., Lambot, S. 2012. Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping. *J. Hydrol.* 425, 112–123. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.034>. Acesso: 10 Mar, 2019.
- Nanni, M.R. & Demattê, J. A. M. 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 393-407.
- Nazli, H., Sezgin, M. 2011. Effects of different soil types on strip-map GPR SAR images. *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XVI*. 8017, 80170Y 1-8.
- Neal, A. 2004. Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principle, Problem and Progress. *Earth Science Reviews*. 66, 261-330. Disponível: Doi: 10.1016/j.earscirev.2004.01.004. Acesso: 05 Mar. 2019
- Nunes, J. G. S., Uagoda, R., Caldeira, D., Braga, L. M., Hussain, Y. , Carvajal, H. M. 2019. Aplicação do gpr para análise e diferenciação entre materiais aluvionares e coluvionares, embasadas em observações diretas, no Vale do Ribeirão Contagem - Distrito Federal (Brasil). *Revista Brasileira De Geomorfologia*. 20, 217-238, Disponível: DOI: 10.20502/rbg.v20i2.1382. Acesso: 02 Mar. 2019.
- Price, J. C. 1994. How unique are spectral signatures? *Remote Sensing of Environment*, v. 49, n. 3, p. 181–186.
- Prince, M., Roy, A., Royer, A., Langlois, A. 2019. Timing and spatial variability of fall soil freezing in boreal forest and its effect on SMAP L-band radiometer measurements. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*. 231, 1-10.
- Ramos D.P. 2003. Desafios da Pedologia Brasileira frente ao novo milênio - (CNPS/EMBRAPA). In: Simpósio do XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, SP, 2003. Anais. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo,- 9p.
- Rodrigues, M., Nanni, M. R., Cezar, E., Abrantes Dos Santos, G. L. A., Silveira Reis, A., De Oliveira, K. M. Evaluation of the use of spectroradiometry for the determination of soil exchangeable ions after the application of mining coproducts. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2019. Disponível: doi:10.1080/05704928.2019.1683569. Acesso 12 Mar. 2019.
- Royle J A, Nychka D. 1998. An algorithm for the construction of spatial coverage designs with implementation in SPLUS. *Comput Geosci*. 24, 479-488.
- Sanchez, P. A., Ahamed, S., Carré, F., Hartemink, A. E., Hempe, J., Huising J., Lagacherie P., Mcbratney A. B., Mckenzie N. J., Santos M. L. M., Minasny B., Montanarella L., Okoth P., Palm C. A., Sachs J. D., Shepherd K. D., Vågen T. G., Vanlauwe B., Walsh M. G., Winowiecki L. A., Zhang G. L. 2009. “Digital soil map of the world”. *Science*. 325(5941), 680-681.
- Shepherd, K.D., Walsh, M.G. 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 988-998.
- Shimada, M., Isoguchi, O., Tadono, T., Isono, K. 2009. Palsar Radiometric and Geometric Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 3915-3932.
- Selige T., Bohner J, Schmidhalter U. 2006. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. *Geoderma*. 136, 235-244.
- Silva, B. A., Martins V. M., Hayawaka E. H., Macedo R. S. 2018. Mapeamento Digital De Solos E Os Atributos Topográficos Das Vertentes No Alto Curso Da Sub-Bacia Hidrográfica Do Córrego Quatro Pontes, Pr-Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 4.
- Slater, L., Comas, X. 2009. The contribution of ground penetrating radar to water resource research. In: Jol, H.M. (Ed.), *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 203–246.
- Souza, E., Fernandes Filho, E. I., Schaefer, C. E. G. R., Batjes, N. H., Santos, G.R., Pontes, L.M. 2016. Pedotransefer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. *Scientia Agricola* vol: 73, Pag: 525-534,

198-230,

- Stoner, E. R., Baumgardner, M. F. 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Science Society of America. Journal, Madison. 45, 1161-1165,
- stenberg, b., jonsson, a., borjesson, t. 2002. Near infrared technology for soil analysis with implications for precision agriculture. In: NEAR INFRARED SPECTROSCOPY: PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE, Chichester, Anais...Chichester, NIR Publications. 2002. 279-284.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J. 2010. Visible and near infrared spectroscopy. In: Soil Science. Adv. Agron. 107, 164-206.
- Taghizadeh - Mehrjardi, R., Nabiollahi, K., Kerry, R. 2016. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. Geoderma. 266, 98–110.
- Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K. 1982. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume 2: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, AddisonWesley, Advanced Book Program: Reading, Massachusetts, pp. 609.
- Valeriano, M. M., Epiphanyo, J. C. N., Formaggio, A. R., Oliveira, J. B. 1995. Bidirectional reflectance of tropical soils. International Journal of Remote Sensing, London. 16, 113-128.
- Van Dam R. L. 2012. Landform characterization using 62 geophysics-Recent advances, applications, and emerging tools. Geomorphology. 137, 57–73.
- Viscarra Rossel, R. A., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D. J., Demattê, J. A. M., Shepherd, K. D., Shi, B. Stenberg, A. Stevens, V. Adamchuk, H. Aichi, B. G. Barthès, H. M. Bartholomeus, A. D. Bayer, M. Bernoux, K. Böttcher, L. Brodský, C. W. Du, A. Chappell, Y. Fouad, V. Genot, C. Gomez, S. Grunwald, A. Gubler, C. Guerrero, C. B. Hedley, M. Knadel, H. J. M. Morrás, M. Nocita, L. Ramirez-Lopez, P. Roudier, E. M. Rufast. Campos, P. Sanborn, V. M. Sellitto, K. A. Sudduth, B. G. Rawlins, C. Walter, L. A. Winowiecki, S. Y. Hong, E W. J. 2016. A global spectral library to characterize the world's soil. Earth-Science Reviews. 155, 198-230,
- Viscarra Rossel R. 2008. The Soil Spectroscopy Group and the development of a global soil spectral library. Pedometron, The Newsletter of the Pedometrics Commission of the IUSS, Issue 25.
- Viscarra Rossel R. A., Walvoort D. J. J., Mcbratney A. B., Janik L. J., Skjemstad J. O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma. 131, 59-75.
- Wood, J. 2009. Overview of software packages used in geomorphometry. In: HENGL, T., REUTER, H.I. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier. 10, 257-267.
- Wu, K., Rodriguez, G. A., Zajc, M., Jacquemin, E., Clement, M., De Coster, A., Lambot, S. 2019. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. Remote Sensing Of Environment. 235, 1-9 N°: 111456 Disponível: DOI: 10.1016/j.rse.2019.111456 Acesso: 25 mar. 2019
- Young, I. M., Crawford, J. W. 2004. Interaction sand self-organization in the soil- microbe complex. Science. 304, 1634–1637.
- zajícová, K., Chuman, T. 2019. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. Geoderma. 343, 116–129.
- Zhang, X. L., Dao, L. G., Zhang, C. S., Morrison, L., Hong, B., Zhang, H. X., Gan, Y. M. 2018. Mapping the spatial distribution of soil depth in a grassland ecosystem with the aid of ground penetrating radar and GIS (Northwestern Sichuan, China). Grassland Science. 64, 217-225.