



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Estimativa da profundidade do solo: Parte 1 - Métodos de campo

Gean Paulo Michel - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Autor correspondente. E-mail: gean.michel@ufrgs.br

Masato Kobiyama - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Artigo recebido em 13/11/2015 e aceite em 28/12/2015.

RESUMO

A profundidade do solo é um parâmetro de extrema importância e de difícil estimativa em diversos estudos ambientais, principalmente geomorfológicos e hidrológicos. Além disso, a profundidade do solo é uma das variáveis dos sistemas de encostas com comportamento menos compreendido pela comunidade científica. O presente trabalho é o primeiro de dois artigos que têm como objetivo apresentar o estado da arte referente aos métodos utilizados para estimativa deste parâmetro. Neste primeiro artigo são abordados os métodos de campo, sendo que estes ainda foram subdivididos em: (i) métodos de referência; e (ii) métodos geofísicos. Os métodos de referência caracterizam-se principalmente pela abertura de trincheiras, tradagem e uso de penetrômetros. Os geofísicos englobam, principalmente, métodos sísmicos, elétricos e eletromagnéticos. O avanço nas técnicas de aplicação dos métodos geofísicos demonstra sua grande potencialidade para identificar formações na subsuperfície. Entretanto, os métodos de referência, embora rudimentares, ainda são necessários para validação das informações obtidas com os demais métodos.

Palavras-chave: Profundidade do solo, métodos de campo, métodos de referência, métodos geofísicos

Soil depth estimation: Part 1 – Field methods

Abstract

Soil depth is an important parameter which is hard to be estimated in various environmental studies, mainly geomorphic and hydrological ones. Furthermore, the soil depth is one of the most unknown variables of the hillslope system for the scientific community. The present work is the first of two papers that aim to present the state of the art related to methods to estimate soil depth. This paper addresses the field methods that are divided in two types: (i) reference methods; and (ii) geophysical methods. The reference methods are characterized for opening trenches, borehole and the use of penetrometers. The geophysical ones include mainly seismic, electric and electromagnetic methods. The improvement in the geophysical methods demonstrates a great potential to identify subsurface formations. However, the reference methods, that are more rudimentary, still remain necessary for validation of the information obtained by the other methods.

Keywords: Soil depth, field methods, reference methods, geophysical methods

Introdução

A profundidade do solo é um parâmetro de extrema importância para inúmeros estudos ambientais, sendo que, em determinadas situações, torna-se imprescindível estimar sua distribuição espacial. A análise de bacias hidrográficas em áreas dominadas por processos geomorfológicos ativos é frequentemente dificultada pela falta de métodos confiáveis para estimativa deste parâmetro. Sua distribuição espacial é controlada por um conjunto de fatores que interagem entre si, gerando alta variabilidade espacial e dificultando sua definição (Tesfa et al., 2009). A medição deste parâmetro é trabalhosa e demorada, mesmo para pequenas bacias (Dietrich et al., 1995). Dessa forma, a profundidade do solo é uma das variáveis físicas menos compreendidas dos sistemas de encostas (Catani et al., 2010).

Existem abordagens completamente diferentes para determinação deste parâmetro, visto que o entendimento acerca dos limites do solo é diferenciado para distintos ramos da ciência. O estudo do solo e de suas propriedades há muito tempo vem sendo realizado por diferentes perspectivas. A definição mais básica que pode ser atribuída ao solo é: um manto fino situado abaixo da superfície terrestre (Simonson, 1968). Segundo EMBRAPA (2006), o solo é um material trifásico, dinâmico, composto por minerais e material orgânico que ocupa maior parte da superfície dos continentes. Este material pode conter matéria viva, inclusive vegetação, e pode ter recebido modificações de origem antrópica. Além disso, apresenta-se em camadas, ou horizontes, que modificam-se ao longo do tempo por ação de mecanismos bióticos e abióticos. Diversos ramos da ciência (pedologia, edafologia, engenharia, geologia, geomorfologia, hidrologia, entre outros) estudam as propriedades, gênese e evolução do solo. Justamente por isso, muitas vezes, existe certa dificuldade em combinar conceitos e teorias oriundos de áreas distintas.

A profundidade do solo é considerada um dos mais importantes fatores no controle de processos causadores de desastres, tais como os escorregamentos de terra e as inundações (Segoni et al., 2012; Wu e Sidle, 1995, Dietrich et al., 1995). Assim, para realizar o gerenciamento de tais desastres, comumente são aplicadas medidas estruturais e não estruturais. No caso de aplicação de medidas estruturais, como obras de contenção de encostas ou barragens para fluxos de detritos, a definição da profundidade do solo é de extrema relevância na elaboração do projeto e dimensionamento das estruturas. No caso de

medidas não estruturais, tais como o mapeamento das áreas propensas a estes fenômenos, a profundidade do solo também é de extrema importância, visto que este parâmetro controla a maioria dos processos hidrogeomorfológicos.

Mais especificamente abordando a influência da profundidade do solo na ocorrência de eventos extremos, diversas análises de sensibilidade aplicadas a equações e modelos utilizados para cálculo da estabilidade das encostas demonstraram que a variação da profundidade pode alterar significativamente os resultados encontrados (Hammond et al., 1992; Borga et al., 2002). Michel (2013) demonstrou que o principal fator que afeta o valor final do fator de segurança das encostas é a declividade e, em segundo lugar, a profundidade do solo. Assim, fica claro que a aplicação bem sucedida da modelagem e o mapeamento adequado de locais propensos a escorregamentos dependem da correta determinação da distribuição espacial da profundidade do solo na bacia.

A profundidade do solo também tem sido apontada como um parâmetro muito relevante em análises hidrológicas de bacias hidrográficas (Tesfa et al., 2009). Pelletier e Rasmussen (2009) ressaltaram a teoria de que a espessura do solo exerce um controle de primeira ordem na resposta hidrológica de bacias hidrográficas montanhosas. Portanto, as estimativas quantitativas e os métodos de medição para geração de mapas de espessura do solo de alta resolução são cruciais para uma modelagem hidrológica confiável e precisa (Liu et al., 2013). Além disso, Fu et al. (2011) relataram que a profundidade do solo exerce relevante influência sobre as taxas de erosão relacionadas a eventos chuvosos. Ainda mais, a profundidade do solo também pode ser utilizada para derivar uma série de outros parâmetros necessários para estudos ambientais (Liu et al. 2013), tais como capacidade de armazenamento de água e a transmissividade do solo, muito importantes para processos de modelagem hidrológica. Assim, a profundidade do solo mostra-se um parâmetro de extrema importância também no gerenciamento de bacias hidrográficas.

Atualmente existem diversas maneiras de medir ou estimar a profundidade do solo. Os métodos existentes podem ser divididos em métodos de campo e métodos matemáticos. Os métodos de campo englobam os métodos geofísicos de estimativa da profundidade, além de um método de referência. Os métodos matemáticos são aqueles que realizam a estimativa da profundidade através de equações

matemáticas, sejam elas geradas por análises estatísticas ou relações físicas. Assim, o presente trabalho é o primeiro de uma série de dois artigos. No primeiro artigo há uma discussão sobre o conceito de solo e, posteriormente, é apresentado o estado de arte dos métodos de referência e geofísicos para estimativa da profundidade do solo. No segundo artigo (Michel e Kobiyama, submetido) é apresentado o estado da arte dos métodos matemáticos de estimativa da profundidade.

Ciências do Solo

As primeiras teorias que abordaram o tema solo foram propostas pelo químico alemão Justus von Liebig, no século XIX, e modificadas posteriormente por cientistas agrícolas (USDA, 1993). Devido a este fato, os solos raramente eram examinados a uma profundidade abaixo daquela relativa à produção agrícola. Esta tendência influenciou o entendimento do solo para os profissionais da época, que acabaram por desenvolver a teoria de balanço de nutrientes, onde o solo era considerado um volume de reserva de nutrientes para as plantas.

Posteriormente, a visão geológica do solo passou a ser desenvolvida. No entendimento geológico, o solo poderia ser encarado como rocha desintegrada, onde os processos de intemperismo têm grande influência na formação da morfologia terrestre. Sendo assim, o solo seria o principal produto do intemperismo das rochas e teria suas características definidas, principalmente, pelo material litológico de origem (USDA, 1993). Estudos posteriores encontraram ainda mais propriedades do solo que demonstravam que outros fatores que influenciavam nas características do solo além do material de origem. Por exemplo, a influência da topografia e da presença de vegetação gerava solos contrastantes em regiões com materiais de origem similares.

A escola de Dokuchaiev, na Rússia no final do século XIX, revolucionou o conceito de solo. Em sua visão, os solos eram concebidos como corpos independentes, cada qual com propriedades únicas resultantes da combinação singular de clima, matéria viva, material de origem, relevo e tempo (Gedroiz, 1927). Assim, o solo refletiria o efeito combinado de fatores de gênese e transformação, responsáveis por sua formação. Este novo conceito requeria que todas as propriedades do solo fossem consideradas coletivamente em termos de um corpo natural completamente integrado e, conseqüentemente, possibilitou o desenvolvimento da pedologia atual.

A abordagem pedológica dos solos também teve grande avanço com os conceitos introduzidos por Jenny (1941). Segundo estes conceitos, que reafirmam a escola russa, o material de origem (*p*), clima (*c*) e os organismos vivos (*o*) são os fatores preponderantes formadores do solo. Visto que os solos modificam-se com o tempo em um processo de evolução, o fator tempo (*a*) é relevante em sua formação. A topografia (*r*), que rege o comportamento do fluxo da água nos solos e, conseqüentemente, o transporte de sedimentos, também é importante no processo de formação. Ainda segundo estes conceitos, os fatores mencionados acima são variáveis independentes que definem um sistema de solo, sendo chamados então de fatores condicionantes. Por isso, para determinada combinação de *p*, *c*, *o*, *a* e *r*; existiria apenas um tipo de solo. Assim a seguinte relação foi proposta:

$$S = f(p, c, o, a, r)$$

Em que *S* representa a magnitude de alguma propriedade do solo, tal como pH, teor de argila, porosidade, densidade, etc. Segundo McBratney et al. (2003), esta equação é insolúvel. Entretanto, inúmeros pesquisadores vêm utilizando-a como uma lista qualitativa dos fatores que podem ser importantes para manifestação de um padrão de solo em determinada região. Muitos outros vêm realizando análises quantitativas através de estudos de caso, formalizando inúmeras funções para definição de diversas propriedades do solo através de análises numéricas e estatísticas sofisticadas.

Assim, o entendimento das propriedades dos solos e sua distribuição vêm avançando. Atualmente, duas são as abordagens mais comuns para o solo: pedológica e edafológica. A diferença essencial entre estas duas abordagens é que a primeira trata da gênese, formação, classificação do solo e descrição de suas propriedades, enquanto que a segunda estuda o solo em relação ao crescimento e produção de plantas. Além disso, a pedologia dá menos ênfase à utilização prática imediata do solo que a edafologia. Outras ciências também dedicam-se ao estudo dos solos, mas de maneira indireta (engenharia, geomorfologia, hidrologia, entre outros), diferentemente da pedologia e edafologia.

Segundo Finkl (2008), existem quatro principais percepções técnicas do solo, as quais são: edafológica, geográfica, pedológica e da engenharia. A visão edafológica é aquela que trata o solo como meio natural para o crescimento de plantas terrestres; enquanto que a visão geográfica está mais associada ao estudo da distribuição

espaçial dos solos. O conceito pedológico traz o estudo dos solos como corpos independentes, cada um com uma configuração distinta resultada do efeito integrado do clima e da matéria. Para a engenharia o solo pode ser interpretado como com o qual e sobre o qual se constroem as estruturas, ou seja, inclui qualquer material situado entre a superfície do terreno e a rocha sã.

Na hidrologia, o solo comumente é tratado como um meio onde ocorre a infiltração e percolação da água e onde se desenvolve boa parte do ciclo hidrológico. Para os hidrólogos, o solo pode atuar como um meio de purificação para a água ou como um volume de reserva para suprimento (Schaetzl e Anderson, 2005).

Do ponto de vista da geomorfologia, o tipo de solo, taxas de desenvolvimento e formas adquiridas dependerão diretamente de processos influenciados pela paisagem. Assim, o solo seria o resultado de uma interação dos processos geomorfológicos e materiais presentes na superfície terrestre ao longo do tempo (Daniels e Hammer, 1992). Assim, a abordagem geomorfológica funde-se com a hidrológica, visto que, embora a estratigrafia e topografia controlem o sistema hidrológico, a hidrologia envolve as forças governantes primárias no processo de formação do solo.

Nomenclatura associada ao tema

Para um maior esclarecimento dos conceitos mais gerais utilizados para definição de solo, faz-se necessário a breve apresentação de mais alguns termos, tais como regolito, saprolito e horizontes do solo. Os horizontes do solo podem ser entendidos como camadas de solo formadas por processos pedogenéticos que estão dispostas de maneira aproximadamente paralela à superfície (Shaw, 1927). Partindo do pressuposto da pedologia, onde os agregados do solo geralmente são adaptados para funções específicas, o padrão evolucionário do solo regula quais são as características que determinadas zonas (camadas) irão adquirir ao longo do tempo e, por conseguinte, as separarão das demais. Assim, esta camada (zona) se tornará única e distinta das camadas acima e abaixo, tornando-se um horizonte diferenciável do solo (Schaetzl e Anderson, 2005).

Embora existam inúmeros arranjos diferentes para composição dos solos, os seus horizontes são geralmente divididos em algumas classes: O, A, E, B, C e R. O horizonte O é o horizonte orgânico em vários estágios de decomposição; o horizonte A é um horizonte mineral, situado na superfície ou abaixo do horizonte O e caracterizado pela acumulação de

material orgânico humificado misturado com a fração mineral; o horizonte E é um horizonte mineral de coloração clara no qual há grande perda de minerais intemperizáveis, argila, ferro, alumínio, húmus ou alguma combinação, deixando grande concentração de grãos de quartzo ou outro material resistente; o horizonte B é um horizonte mineral subsuperficial dominado por materiais iluviados das camadas superiores, sem estruturas geológicas e/ou com alta fragilidade; o horizonte C é um horizonte mineral que foi fracamente afetado por processos pedogênicos e que mantém estruturas da rocha matriz (se residuais) ou sedimentárias (se transportadas); o horizonte R refere-se à rocha sã, contínua e suficientemente coerente para tornar impraticável a perfuração à mão (Guthrie e Witty, 1982).

Segundo EMBRAPA (2006), o limite superior do solo é a atmosfera; os limites laterais são contatos com corpos d'água, rochas, gelo, materiais detríticos inconsolidados, aterros ou terrenos abaixo de corpos hídricos permanentes; e o limite inferior é de difícil definição. Existe uma mudança gradual, ao longo da profundidade, a partir do solo para a rocha sã, ou ainda para sedimentos que não apresentam sinal de influência de atividade biológica. Portanto, o material abaixo da camada onde inicia-se o predomínio das características da rocha matriz, neste caso, não é considerado solo. Desta maneira, fica claro que, segundo a definição de EMBRAPA (2006), o solo tem uma íntima ligação com atividade biológica, sendo que, os materiais localizados em zonas onde não há efetivamente tal atividade, não são considerados solo.

O termo saprolito é utilizado para designar a rocha intemperizada na qual a estrutura da rocha matriz, originalmente expressa pelo arranjo dos constituintes minerais primários da rocha (e.g., cristais e grãos), é mantida (Becker, 1895). Sob uma óptica de horizontes do solo, o saprolito é equivalente ao horizonte C. Dentro de uma visão geomorfológica da paisagem, também é feita uma diferenciação entre solo, onde já não existem as características estruturais da rocha matriz, rocha intemperizada e rocha sã subjacentes (Dietrich et al., 2003). O saprolito, embora intemperizado, ainda não teve suas partículas movidas fisicamente, e isso afeta drasticamente os processos de transporte de massa ao longo das encostas. Isso também gera uma distinção entre processos de intemperismo e produção de solo, sendo que o intemperismo altera o estado do material, mas não necessariamente causa sua ruptura, o que seria necessário para disponibilizá-lo para o transporte.

O termo regolito foi proposto por Merrill (1897) na intenção de referir-se a massa não consolidada de espessura variável que cobre as rochas. Nesta definição, o regolito é composto pelo material oriundo do intemperismo de rochas in situ ou de material fragmentado e decomposto transportado pelo vento, água ou gelo desde outras fontes. Eggleton (2001) refere-se ao regolito como a totalidade da cobertura não consolidada ou secundariamente recimentada que se sobrepõe a um manto rochoso mais coerente. Acrescenta ainda que a cobertura pode ter sido formada por intemperismo, erosão, transporte e/ou deposição de materiais mais antigos. Assim, o regolito incluiria o embasamento rochoso fraturado ou intemperizado, saprolitos, solos, acumulações orgânicas, material vulcânico, depósitos glaciais, colúvios, alúvios, sedimentos evaporíticos, depósitos eólicos e águas subterrâneas. Uma outra definição mais simples, ainda proposta por Eggleton (2001), é: “tudo que está situado entre a rocha sã e a atmosfera”.

De acordo com Hunt (1967), os geólogos usam o termo “solo” para referir-se a uma camada superficial alterada pelo intemperismo. Isto

mostra que, para os geólogos, o solo equivale a todo ou a parte do regolito. O conceito utilizado pelos engenheiros é similar ao conceito utilizado pelos geólogos (Hough, 1957). Engenheiros referem-se ao termo “solo” como o material que pode ser removido em escavações, usado como preenchimento ou como fundação para as estruturas. Portanto, em um contexto de engenharia, o solo equivale ao regolito, abrangendo todo o material não consolidado, mesmo se este estiver a profundidades elevadas (Simonson, 1968).

A Figura 1 exprime as denominações utilizadas para as diferentes camadas do solo e mostra a perspectiva de diferentes ramos da ciência acerca do que consideram sendo solo. O presente trabalho traz como conceito de solo uma definição similar àquela utilizada pela geomorfologia e hidrologia. Assim, o solo é definido como o material inconsolidado na superfície terrestre, com ausência de características estruturais da rocha matriz, por onde os processos de percolação e transporte hídrico atuam mais fortemente.

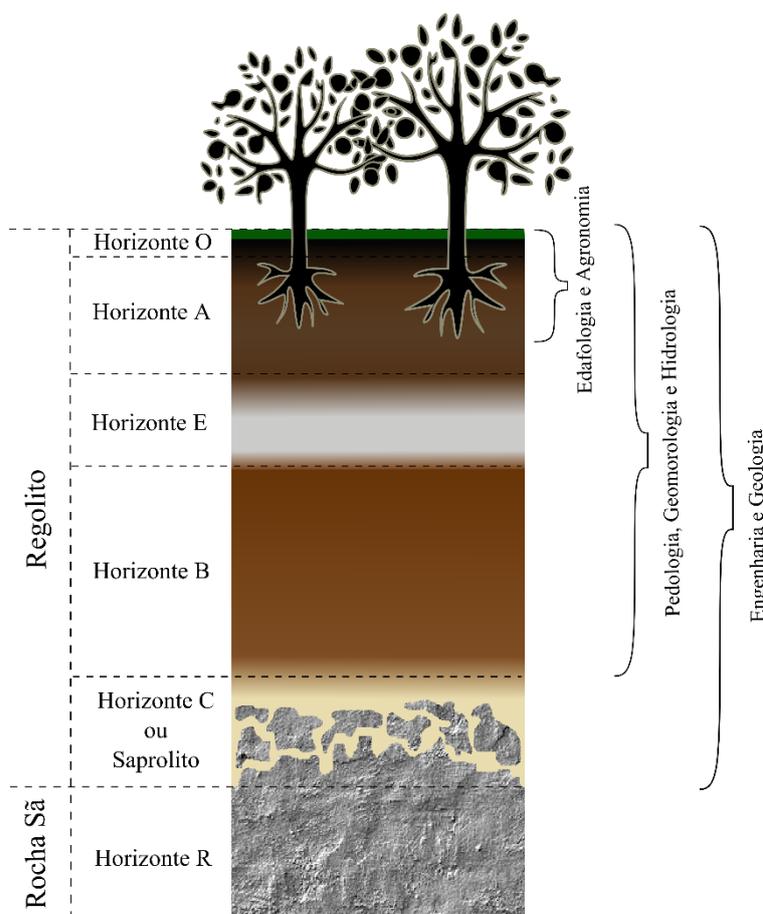


Figura 1 – Camadas, horizontes e diferentes perspectivas acerca do solo. À esquerda está descrito como estão tradicionalmente dispostos os horizontes do solo e à direita está a perspectiva de diferentes ramos da ciência acerca do que é considerado solo.

Métodos de campo

A partir da definição mencionada acima, o presente trabalho busca estabelecer o estado da arte dos métodos de campo existentes para estimativa da profundidade do solo. A estimativa da profundidade do solo é uma tarefa essencial em inúmeros tipos de análises e estudos, sendo muito trabalhosa, mesmo para pequenas bacias ou áreas específicas (Dietrich et al., 1995). Isto se deve

principalmente a grande variabilidade espacial deste parâmetro combinada à dificuldade de aplicação das técnicas de medição existentes. Na medição da profundidade do solo, os métodos de campo podem ser divididos em dois grupos: de referência e geofísicos. A Figura 2 mostra a classificação dos métodos de campo.

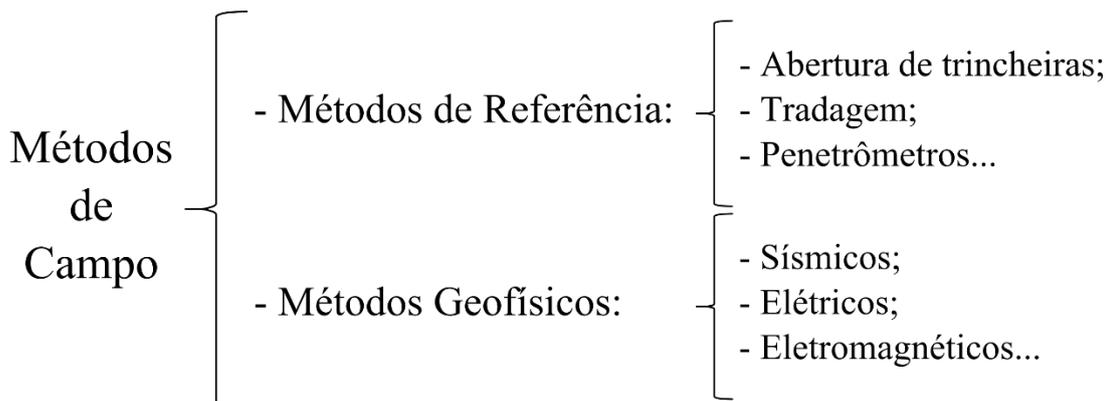


Figura 2 – Classificação dos métodos de campo para estimativa da profundidade do solo.

Métodos de Referência

Os métodos de referência baseiam-se no uso de pás, trados e penetrômetros, entre outros. Estes métodos oferecem uma informação pontual acerca da profundidade e características do perfil do solo. Desta maneira, geralmente é realizada a subdivisão da área de estudo em zonas uniformes distintas para aplicação do método. Por exemplo, separação de áreas por declividade, uso do solo, tipos de solo ou litologia (Bell e Fischer, 1993).

O uso de pás é mais comum no caso de necessidade de abertura de trincheiras, onde existe a possibilidade de se conduzir um estudo pedológico mais detalhado das características do solo e suas variações em determinado local. Para estudos que abrangem grandes áreas, ou na tentativa de entender a distribuição espacial da profundidade do solo, a utilização de pás e trincheiras torna-se inviável.

As sondagens a trado baseiam-se em perfurações, manuais ou motorizadas, geralmente de pequeno diâmetro. São comumente utilizadas para coleta de amostras em determinadas profundidades sem a necessidade de abertura de trincheiras. Podem ser também utilizadas para medir a profundidade do solo quando a ponteira do trado é conduzida até a interface entre o solo e a rocha.

Os penetrômetros são utilizados geralmente para avaliar o grau de compactação do solo ao longo do perfil, porém, também podem ser

utilizados para medir a profundidade do solo. Os penetrômetros geralmente são constituídos por uma haste fina (diâmetro não superior a 20 mm) com uma ponteira em formato de cone que auxilia na penetração da haste no solo (Rooney e Lowery, 2000). Na metodologia tradicional de aplicação de penetrômetros, é medida a força necessária aplicada para que o instrumento penetre até determinada profundidade. A partir destes dados obtêm-se informações sobre o nível de compactação do solo através do *cone index (CI)*. Atualmente, os penetrômetros estão sendo combinados a outros tipos de sensores para aquisição de informações adicionais além do grau de compactação, tais como textura e índice de umidade (Rooney e Lowery, 2000; Vaz e Hopmans, 2001; Sun et al., 2013). Desta maneira, a profundidade do solo também pode ser avaliada através do uso de penetrômetros, principalmente quando aplicado a solos rasos.

Os métodos de referência são caracterizados pelo uso de força mecânica, podendo também ser chamados de métodos mecânicos. Visto que estes métodos utilizam-se de leituras diretas da profundidade do solo, também podem ser chamados de métodos diretos. Desta maneira, métodos de referência, mecânicos ou diretos são expressões análogas.

Métodos geofísicos

Os métodos geofísicos abrangem, principalmente, três métodos distintos: sísmicos, elétricos e eletromagnéticos. Estes métodos baseiam-se no princípio de propagação de ondas e da resistividade elétrica para estimativa da profundidade do solo e, algumas vezes, da rocha subjacente, além de outras características. Existem também outros métodos geofísicos capazes de fornecer informações acerca da profundidade do solo (gravimétrico e magnético), entretanto são muito pouco utilizados para tal finalidade. Diferentemente dos métodos de referência, os resultados obtidos através da aplicação destas técnicas geralmente são expressos em termos de perfis transversais ou longitudinais de encostas, planícies de inundação, topos de morro, entre outros. A grande vantagem da aplicação dos métodos geofísicos para levantamentos de estruturas na subsuperfície é o fato de serem não invasivos (Tabbagh et al., 2000; Samouelian et al., 2003; Michot et al., 2003). Assim, estes métodos podem ser de grande auxílio em estudos de solo, visto que não causam distúrbios em sua estrutura e nem em sua dinâmica. Além disso, os métodos mecânicos de prospecção são incompatíveis com estratégias de amostragem com alta densidade espacial, já que isto acarretaria na destruição do objeto de estudo. Assim, os métodos de referência e geofísicos são complementares, sendo que as trincheiras, escavações e tradagens podem ser realizadas conforme a necessidade de dados para confirmação das hipóteses levantadas pelos estudos geofísicos (Tabbagh et al., 2000).

Métodos sísmicos (reflexão/refração sísmica)

Teoria

Os métodos de exploração sísmica consistem em: criar ondas sísmicas na subsuperfície e observar, na superfície, as ondas refletidas pelos leitos geológicos ou refratadas ao longo de determinadas interfaces (Lavergne, 1989). As perturbações propagam-se na subsuperfície através de ondas progressivas que

têm sua reflexão e transmissão intensificada quando alcançam as fronteiras entre diferentes camadas pedológicas. As ondas refletidas retornam a superfície onde são detectadas, e este é o princípio do método de reflexão sísmica. As ondas transmitidas podem propagar-se horizontalmente por uma certa distância e então retornar a superfície. Este é o princípio do método de refração sísmica. As ondas são criadas pelo martelamento de uma placa de metal ou com o uso de explosivos (Assaad, 2009).

As interfaces geológicas identificadas por prospecção reflexiva são interfaces de meios com diferentes impedâncias acústicas. Por definição, a impedância acústica é o produto da densidade do material multiplicada pela velocidade de propagação da onda sísmica. As interfaces observáveis pela prospecção refratária são aquelas onde a velocidade de propagação no meio subjacente é maior que na camada superior (regolito). Isto já demonstra uma limitação do método de refração, pois, em locais onde as velocidades de propagação não aumentam com a profundidade, este método não é aplicável (Bery, 2013). Esta limitação não é detectada no método de reflexão. As prospecções sísmicas são uma poderosa ferramenta de investigação subsuperficial. A profundidade de alcance destes métodos pode chegar a 10 km (Lavergne, 1989), sendo que o método de refração é mais comumente utilizado para análises relacionadas a pequenas profundidades enquanto que o método de reflexão para grandes profundidades.

No método da reflexão sísmica, é medido o tempo de percurso de ondas sísmicas que são refletidas pelo manto rochoso e diretamente retornam ao geofone (Assaad et al., 2004). A origem das ondas, geralmente geradas por golpes de martelo, é situada próxima aos geofones, para aumentar a intensidade de energia da onda refletida. A Figura 3 mostra um esquema ilustrativo do funcionamento de ambos os métodos.

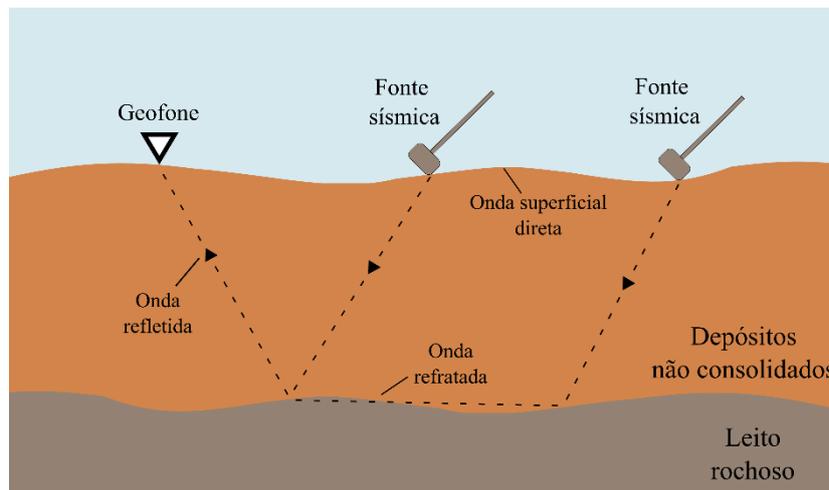


Figura 3 – Métodos de reflexão e refração sísmica. (modificado de Driscoll, 1986)

Dolan e Pratt (1997) utilizaram o método da reflexão sísmica para mapear perfis situados na zona da falha geológica de Santa Monica, California. Os autores comentaram que o uso do método combinado com aberturas de trincheiras pode revelar detalhes da geometria, dinâmica e histórico de movimentação de falhas geológicas ativas. Hunter et al. (1984) sugeriram que a aplicação da técnica de reflexão sísmica seja realizada para mapeamento da interface entre rocha e regolito somente em locais onde o horizonte de observação exceda 20 m de profundidade, ou seja, onde o regolito supere 20 m de espessura. Em profundidades menores que 20 m, poderá ser inviável separar os contrastes de interesse de ondas que chegam aos geofones praticamente ao mesmo tempo, tais como as ondas diretas, refletidas e o som do martelo.

Os métodos de refração sísmica são capazes de determinar a espessura e extensão de aquíferos ou onde há aumento de densidade do material conforme o aumento da profundidade (Assaad et al., 2004), portanto podem ser utilizados para estimativa da profundidade do solo. Durante a aplicação do método de refração, deve-se medir o tempo que a onda sísmica leva para chegar a um ou mais geofones colocados a uma distância conhecida da origem da onda. A profundidade de diversas unidades geológicas pode ser estimada plotando a relação distância-tempo visto que cada unidade sucessivamente inferior tem uma velocidade sísmica mais alta. Velocidades de propagação de ondas sísmicas maiores indicam um material de maior densidade, tipicamente quantificando a resistência ou alguma outra característica do material (Meyer et al. (2007). Anomohanran (2013) demonstrou a possibilidade da identificação da espessura de diversas camadas diferentes que compõem o solo

e também o leito rochoso. Este autor propõem uma metodologia onde os resultados dos ensaios passam por um tratamento matemático no qual podem ser observadas as mudanças de velocidade de propagação da onda em diferentes camadas subsequentes.

A técnica da refração sísmica foi o primeiro grande método geofísico aplicado na procura por petróleo. Embora seu uso para estes fins venha diminuindo, para fins de engenharia seu uso vem se intensificando (Bery, 2013). A aplicabilidade do método também tem aumentado devido ao desenvolvimento de novas técnicas, tais como a tomografia de refração sísmica, que são aplicáveis onde o método tradicional geraria falhas. A tomografia de refração sísmica é um método de interpretação dos dados físicos, o qual usa uma técnica de inversão em grade para determinar a velocidade de blocos (pixels) bidimensionais no perfil, em vez de modelar as velocidades em camadas (Bery, 2013). Isto possibilita verificar gradientes de velocidade não apenas horizontais, mas também verticais, permitindo assim a identificação de estruturas complexas de maneira mais precisa.

Sheehan et al. (2005) também relataram o avanço na análise dos dados através da tomografia de refração, porém, alertaram sobre a ocorrência de erros quando as condições de campo divergem dos pressupostos adotados pela técnica. Aplicando a tomografia de refração, estes autores demonstraram que alguns gradientes foram identificados em locais onde não havia nada presente. Portanto, concluíram que no uso das técnicas de refração, os pressupostos adotados por cada metodologia devem ser confrontados com as condições reais de campo.

Aplicação

O método da refração sísmica tem sido empregado em diversos estudos hidrogeológicos, como na determinação da altura do lençol freático em material não consolidado, de origem aluvial ou glacial, situado sobre aquíferos, manto rochoso ou sedimento consolidado (Haeni, 1988). Abidin et al. (2012) utilizaram o método da refração sísmica em locais de deposição de escorregamentos na Malásia. Através de seus dados verificaram a ocorrência de três principais camadas que provavelmente formaram-se em decorrência da deposição de material oriundo de antigos escorregamentos. Os resultados foram comprovados através da abertura de furos de sondagem na área de estudo.

No Brasil, Barsé et al. (2011) compararam os resultados obtidos com o uso do método da refração sísmica e os dados de furos de sondagens realizados anteriormente em uma localidade rural no estado do Rio Grande do Sul. Os autores relataram uma boa coincidência entre a profundidade estimada do manto através do método da refração e os valores reais. Além disso, destacaram que o método é não invasivo, de baixo custo, de rápida aquisição de dados e de reduzido impacto ambiental. Em um estudo com finalidade parecida no Suriname, Herzig e Camargo (2004) relataram que os maiores erros encontrados quando compararam dados de refração sísmica com dados de sondagens foram inferiores a 10%.

Meyer et al. (2007) utilizaram o método da refração sísmica e do penetrômetro para avaliação da profundidade de diferentes horizontes do solo em Sierra Nevada da Califórnia na intenção de verificar sua influência nos padrões de desenvolvimento da vegetação. Segundo estes autores, o uso de penetrômetros é mais adequado para avaliação da profundidade de solos rasos, com ausência de blocos ou de resquícios do material de origem, enquanto que os métodos sísmicos seriam mais adequados para avaliação de solos mais profundos. O estudo concluiu que, para solos com profundidades acima de 50 cm, os dois métodos geram resultados similares de profundidade do solo. Para solos muito rasos (< 20 cm), as estimativas oriundas dos métodos sísmicos são muito variáveis e possivelmente não precisas devido a baixa refração de ondas que ocorre nestas condições. Por outro lado, as estimativas da profundidade através do penetrômetro são muito mais eficazes nestas mesmas condições. Já em solos profundos, a situação se inverte, visto que os métodos sísmicos proporcionam estimativas da profundidade, não só

do solo, mas também de outras camadas, como a de rocha intemperizada. Em alguns estudos, a profundidade da camada de rocha intemperizada pode ser relevante e resultados satisfatórios serão dificilmente obtidos apenas com o uso de penetrômetros. Portanto, a combinação dos métodos pode ser promissora.

Para determinar a espessura do material propenso à escorregamento em uma encosta, Al-Saigh e Al-Dabbagh (2010) aplicaram o método da refração sísmica. Além disso, determinaram a declividade da superfície de ruptura, que muitas vezes pode diferir da declividade superficial da encosta. Os resultados obtidos mostraram grande correlação com valores medidos através de tradagem e evidenciaram a possibilidade do uso da técnica no estudo de fenômenos extremos causadores de desastres.

Métodos elétricos

Teoria

O uso do método da resistividade elétrica se dá no estudo das descontinuidades horizontais e verticais das propriedades elétricas da subsuperfície e também na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala (Kearey et al., 2002). O método é empregado rotineiramente em investigações de engenharia e hidrogeológicas da geologia subsuperficial rasa. Os métodos de levantamento baseados em resistividade elétrica baseiam-se na determinação da distribuição da resistividade do volume de solo sondado. Correntes elétricas artificialmente geradas são aplicadas ao solo e as diferenças potenciais resultantes são medidas (Samouelian et al., 2005). Alterações no padrão de diferença potencial esperada para materiais homogêneos geram informações referentes às formas e propriedades elétricas das não-homogeneidades subsuperficiais (Kearey et al., 2002).

A resistividade é uma das propriedades físicas mais variáveis, e materiais tais como metais e grafite conduzem a eletricidade, facilitando a passagem de elétrons. Entretanto, a maioria dos minerais que formam as rochas, e, conseqüentemente, boa parte dos solos, é isolante. Neste caso, a corrente elétrica é carreada através destes materiais principalmente através da passagem de íons pela água presente nos poros. Portanto, a porosidade é o fator que mais influencia na resistividade das rochas e solo, sendo que a resistividade geralmente aumenta com a redução da porosidade (Kearey et al., 2002).

Em materiais homogêneos, a profundidade da penetração da corrente aumenta conforme aumenta a distância de separação entre

os eletrodos. A separação dos eletrodos deve ser escolhida de tal maneira que a subsuperfície seja energizada até a profundidade de interesse, e deve ser pelo menos igual a esta profundidade. Isto limita as profundidades de penetração devido à

dificuldade existente para energizar seções de grandes comprimentos (Kearey et al., 2002). A Figura 4 demonstra um arranjo comum para aplicação da metodologia da resistividade elétrica.

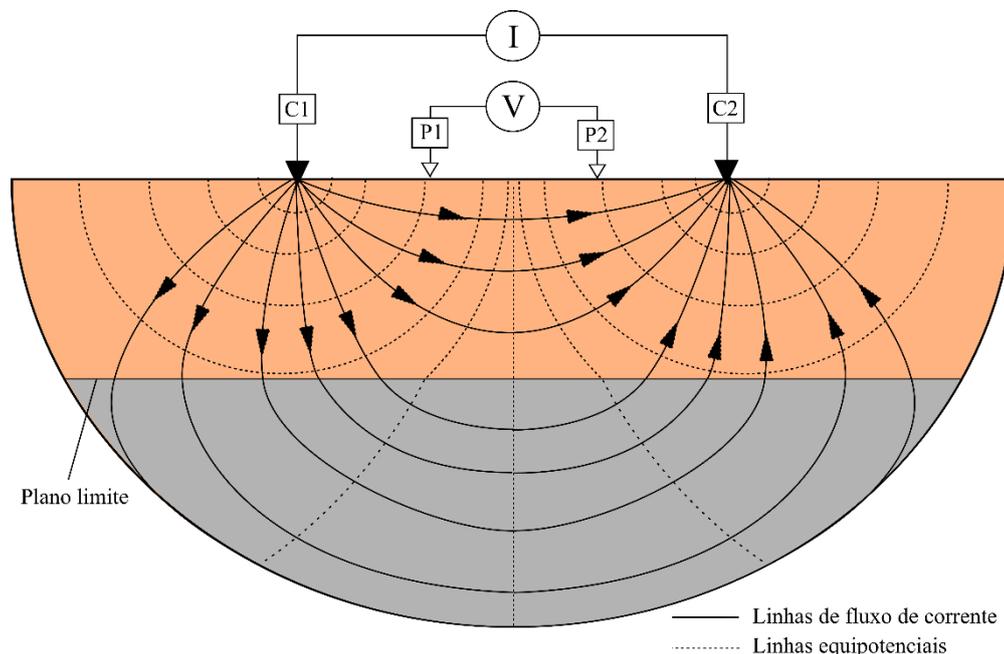


Figura 4 – Princípio de funcionamento do método da resistividade elétrica. Na figura estão representados dois materiais (por exemplo, solo e rocha), nos quais há uma diferença de resistividade (resistividade solo maior resistividade rocha). Os eletrodos de corrente C1 e C2 introduzem a corrente elétrica na subsuperfície e o campo potencial é medido usando os eletrodos potenciais (P1 e P2). A corrente aplicada é medida em I e o potencial é medido em V. (Adaptado de Seidel e Lange, 2007)

Existem dois principais métodos a serem empregados para pesquisas baseadas em resistividade elétrica: sondagem elétrica vertical; e traçado de separação constante. A sondagem elétrica vertical é utilizada principalmente para estudos de interfaces aproximadamente horizontais. Nesta metodologia os eletrodos de corrente e potenciais são mantidos ao mesmo espaçamento relativo e todo o sistema progressivamente é expandido a partir de um ponto central fixo. Assim, as leituras são tomadas com as correntes alcançando profundidades cada vez maiores. A técnica é vastamente utilizada para determinar a profundidade do regolito e determinar zonas de estratos porosos (Kearey et al., 2002).

O traçado de separação constante é utilizado para determinar a variação lateral da resistividade. Os eletrodos de corrente e potenciais são mantidos a uma distância fixa e são progressivamente movidos ao longo de um perfil. O método é empregado para prospecção mineral na localização zonas de falha ou de cisalhamento ou para detectar corpos de condutividade anômala. É comumente utilizado para determinar

os mapas de isolinhas de resistividade (Kearey et al., 2002). O arranjo mais comum é elaborado com quatro eletrodos onde é mantido um espaçamento uniforme entre eles o qual é chamado de configuração de Wenner (Figura 4). Os eletrodos podem ser colocados na superfície ou em orifícios no solo, sendo que, quando colocados em orifícios, os resultados apresentam uma resolução mais alta para profundidade maiores (Samouelian et al., 2005).

No caso de solos, a resistividade elétrica é uma função de inúmeras variáveis, incluindo a natureza dos constituintes sólidos (distribuição do tamanho das partículas, mineralogia), arranjo dos poros (porosidade, distribuição do tamanho dos poros e sua conectividade), grau de saturação, resistividade elétrica do fluido (concentração de soluto) e temperatura (Samouelian et al., 2005). Estes parâmetros afetam a resistividade elétrica de diferentes maneiras e precisam ser considerados quando este método é aplicado.

Segundo Kearey et al. (2002), o método da resistividade elétrica possui algumas limitações, dentre as quais se destacam: (i) interpretações ambíguas - por isso é necessário

que o estudo seja conduzido com apoio de outras técnicas de amostragem para validar as hipóteses definidas; (ii) a interpretação é limitada a configurações estruturais simples; (iii) a topografia e os efeitos das variações da resistividade próximas à superfície podem mascarar efeitos de variações mais profundas; e (iv) a profundidade de penetração do método é limitada pela máxima carga elétrica que pode ser introduzida na subsuperfície e pelas dificuldades físicas de estender longos comprimentos de cabos. Entretanto, esta última limitação não se aplica para mapeamentos de profundidade de solos rasos.

Aplicação

Samouelian et al. (2003) aplicaram este método para imageamento de alta resolução (espaçamento dos eletrodos de 1,5 cm). A intenção destes autores era detectar pequenas rachaduras existentes no solo. Como conclusão, apontaram que até mesmo pequenas estruturas são capazes de causar variações na resistividade do material, visto que foram detectadas pelo método. Assim, seria possível gerar informações sobre as formações da subsuperfície em escala centimétrica.

A localização do lençol freático e suas variações também podem ser identificadas com este método. Michot et al. (2003) utilizaram o método para monitoramento espacial e temporal da umidade do solo em uma plantação de milho irrigada. Segundo os autores, além de conseguir detectar os diferentes horizontes do solo, o método ainda foi capaz de monitorar a dinâmica da água no solo, inclusive indicando zonas de fluxos preferenciais.

Uma das combinações que vêm sendo empregada é o uso de técnicas de resistividade elétrica associadas aos métodos sísmicos. Cada um destes métodos responde a diferentes propriedades geofísicas com resoluções variadas, entretanto, os resultados em ambos os casos podem ser combinados e correlacionados para alcançar informações mais abrangentes referentes ao local de investigação. Os resultados de Kahn (2013) mostraram que ambos os métodos detectaram as mesmas feições na subsuperfície, entretanto com algumas pequenas diferenças na profundidade onde estas feições se manifestavam.

De Vita et al. (2006) aplicaram a metodologia da resistividade elétrica para estudo de materiais piroclásticos propensos a falha e possível ocorrência de escorregamentos e fluxos de detritos na Itália. Segundo estes autores, este método é apropriado para este tipo de estudo devido ao baixo custo e a possibilidade de ser usado até

mesmo em terrenos acidentados de difícil acesso, como são aqueles onde ocorrem escorregamentos e iniciam-se fluxos de detritos. Utilizando também o método de refração sísmica e penetrômetros, além do método da resistividade elétrica, os autores conseguiram diferenciar material piroclástico depositado e manto rochoso fraturado. Além disso, a espessura deste material foi relacionada à declividade da encosta, o que possibilitou a elaboração de um mapeamento da espessura do material para toda a área de estudo de aproximadamente 60 km².

Em uma aplicação ainda mais específica deste método, Piegari et al. (2009) propuseram um modelo semi-empírico conceitual para escorregamentos, onde a estabilidade das encostas está relacionada à declividade e à resistividade do solo, que, por sua vez, é uma função do grau de saturação e porosidade. Os autores afirmaram que as interações entre as variáveis climáticas, decorrentes da incidência de uma estação chuvosa, e a encosta são muito complexas e que a introdução de uma análise através da resistividade elétrica poderia gerar resultados satisfatórios. Desta maneira, os autores descreveram como o decréscimo da resistividade (ocasionado pela saturação do solo) pode causar a instabilidade das encostas.

Métodos eletromagnéticos

Teoria

Segundo Kearey et al. (2002), os métodos eletromagnéticos usam a resposta da subsuperfície à propagação de campos eletromagnéticos que são compostos por uma intensidade elétrica alternada e por uma força magnetizante. Campos eletromagnéticos primários são gerados através da passagem de correntes alternadas por uma bobina e a resposta da subsuperfície se dá com a geração de campos elétricos secundários. Os campos resultantes podem ser detectados pelas correntes alternadas que os mesmos induzem em uma bobina receptora pelo processo de indução eletromagnética.

Sobre princípio de funcionamento de levantamentos baseados em métodos eletromagnéticos, Kearey et al. (2002) explicaram que os campos eletromagnéticos primários viajam de uma bobina transmissora até a bobina receptora por cima e por baixo da superfície. Onde o material subsuperficial é homogêneo não há grande diferença entre os campos propagados acima e abaixo da superfície. Porém, na presença de corpos condutores, o componente magnético do campo eletromagnético penetrante no solo induz correntes alternadas a fluírem no condutor

receptor, criando um campo eletromagnético secundário. As correntes existentes no transmissor criam seu próprio campo eletromagnético secundário que viaja até o receptor. O receptor responde a chegada dos campos elétricos primários e secundários e esta resposta difere em fase e amplitude da resposta do campo primário unicamente. As diferenças entre os campos eletromagnéticos transmitidos e recebidos revelam a presença de condutores e fornecem informações sobre sua geometria e propriedades elétricas.

O radar penetrante no solo (*Ground Penetrating Radar – GPR*), ou georadar, é um aparelho baseado no método eletromagnético. O GPR teve seu uso intensificado na década de 1980 como uma nova técnica que poderia oferecer uma maneira inovadora de visualizar as condições dos solos e rochas em profundidades rasas (Davis e Annan, 1989). Segundo os precursores, o método pode ser útil para mapeamento da espessura do gelo, profundidade de lagos, profundidade do solo e delimitação da superfície do leito rochoso, estratigrafia do solo e profundidade do lençol freático. A grande vantagem do método em relação aos demais é a alta resolução das imagens geradas. O GPR utiliza uma técnica similar ao

princípio da reflexão sísmica, porém com um pulso de energia eletromagnética de alta frequência (10-1000 MHz) que é transmitida para a subsuperfície. A propagação do sinal do radar depende das propriedades elétricas do material subsuperficial.

A Figura 5 ilustra o funcionamento do GPR em campo. Segundo Reynolds (1997), o sistema de radares funciona através de uma antena transmissora (Tr) capaz de gerar uma série de ondas de rádio que se propagam em um feixe largo. Como as ondas de rádio propagam-se em alta velocidade (300.000 km/s no ar), o tempo de viagem de uma onda desde o instante de sua geração até o seu retorno subsequente à antena receptora (Rc) é da ordem de algumas dezenas a alguns milhares de nanossegundos. As antenas podem ser usadas no modo monostático, onde a mesma antena é utilizada como transmissora e receptora de sinal; ou biestático, onde duas antenas são utilizadas, uma como transmissor e outra como receptor. Em casos específicos, a utilização de um modo pode ser mais vantajosa em relação à utilização de outro.

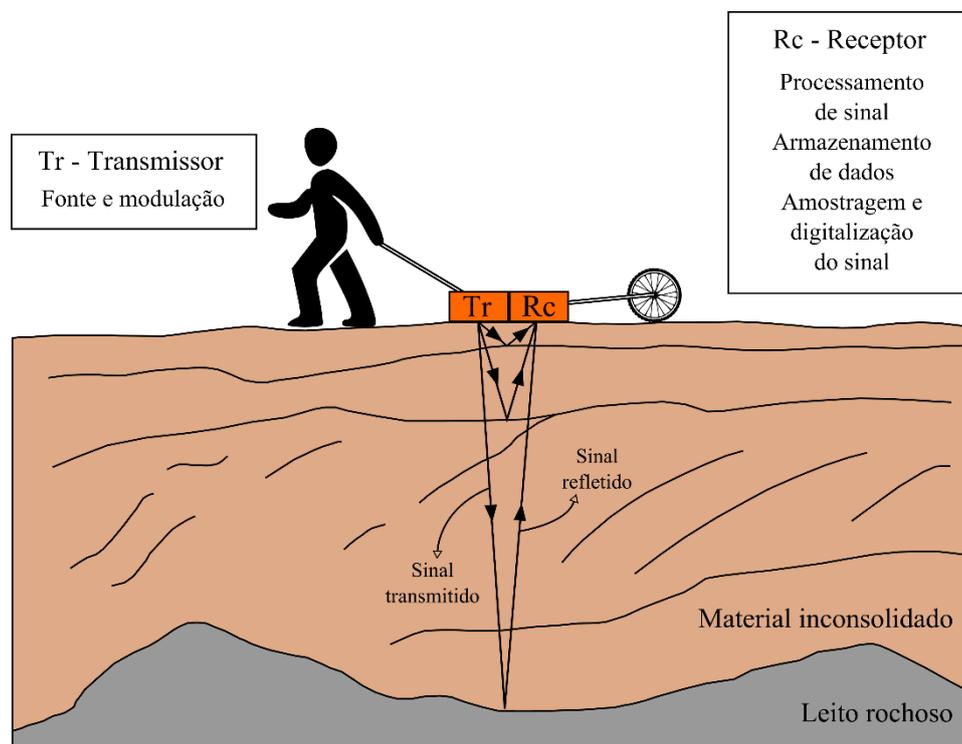


Figura 5 –Sistema GPR e seção interpretada com diferentes feições realçadas. Adaptado de Butler et al. (1990); Reynolds (1997); e Davis e Annan (1989).

O transmissor gera pulsos a uma frequência determinada pelas características da antena e a uma determinada taxa de repetição, tipicamente 50.000 vezes por segundo. O receptor

é configurado para escanear a uma taxa fixa, normalmente até 32 vezes por segundo, dependendo do sistema. Cada escaneamento dura no mínimo tanto quanto a amplitude do tempo

total de viagem (ida e volta), o que pode ser ajustado de dezenas até milhares de nanosegundos. Conforme a antena é movimentada sobre o solo, os sinais recebidos são mostrados como uma função do tempo de viagem da onda no formato de um radiograma (Reynolds, 1997). A profundidade de penetração das antenas depende da frequência de emissão de ondas do aparelho e da natureza do material a ser sondado.

A velocidade das ondas do GPR é controlada pela constante dielétrica (permissividade elétrica relativa) e pela condutividade magnética da subsuperfície (Kearey et al., 2002). Em materiais de alta resistividade elétrica, a velocidade de propagação do pulso é principalmente controlada pela permissividade dielétrica relativa. A condução dielétrica em materiais isolantes ou maus condutores, os quais não têm condutores livres, se dá através da ligeiro deslocamento de elétrons em relação ao seu núcleo. A água tem uma constante dielétrica de aproximadamente 80, enquanto que na maioria dos materiais geológicos secos a constante dielétrica varia de 4 a 8. Consequentemente, a umidade do material exerce forte influência na propagação de um pulso do radar (Davis e Annan, 1989).

O sucesso da aplicação do GPR depende da variabilidade existente entre os materiais subsuperficiais em permitir a transmissão das ondas de rádio. Alguns materiais, tais como gelo polar, são virtualmente transparentes para as ondas de rádio. Outros materiais, como argila saturada e água do mar, absorvem ou refletem as ondas de tal forma que são virtualmente opacos para elas (Reynolds, 1997). É o contraste na constante dielétrica entre camadas sobrepostas que gera a reflexão da radiação eletromagnética incidente, sendo que, quanto maior o contraste, maior é o montante de energia de onda refletida.

Segundo Kearey et al. (2002), basicamente existem três metodologias para aplicação do GPR: (i) perfilamento de reflexão; (ii) sondagem de velocidade e (iii) transiluminação. Na primeira o transmissor e receptor são mantidos a uma pequena distância fixa e deslocados sobre a superfície. É a metodologia mais comumente aplicada (Milsom e Eriksen, 2011). Na sondagem de velocidade, ou ponto médio comum (CMP), o transmissor e o receptor são movidos separadamente a partir de um ponto central, ou um permanece estacionário enquanto o outro é movido gradualmente. Esta metodologia é utilizada para mostrar como a velocidade muda com a profundidade. Sem essa informação é necessário realizar furos de sondagem para correlacionar com as informações

do radiograma. Na transiluminação o transmissor e o receptor são dispostos lados opostos do objeto de interesse (um pilar, por exemplo).

Aplicação

O GPR tem alcançado diversas áreas de estudo, sendo um dos métodos geofísicos mais extensivamente aplicados. Primeiramente foi aplicado para determinação da espessura de gelo em estudos do *permafrost* (Milsom e Eriksen, 2011). Ao notar que as imagens geradas pelo aparelho ultrapassavam a camada congelada, percebeu-se que mais informações poderiam ser extraídas através do tratamento dos dados. Desde então, o GPR vem sendo vastamente utilizado em estudos geológicos, hidrogeológicos (Doolittle et al., 2006; Beres e Haeni, 1991) ambientais (Hruska et al., 1999; Butnor et al., 2001), de engenharia (Saarenketo e Scullion, 2000; Xu et al., 2014), arqueológicos (Conyers, 2013; Vaughan, 1986) e até mesmo forenses (Schultz, 2007).

Doolittle (1987) relatou o uso de um sistema GPR especialmente projetado para reconhecimento do solo, utilizado para mapear a profundidade e a extensão de cada horizonte do solo. O sistema foi usado pelo *Soil Conservation Service* (SCS) da *United States Department of Agriculture* (USDA) para uma grande variedade de solos e localidades no intuito de estimar a composição das unidades pedológicas e analisar a acurácia dos mapeamentos de solo realizados através de procedimentos de amostragem tradicionais. Assim, o autor concluiu que o GPR aumenta a qualidade dos mapeamentos de solos, requer menos pessoas para conduzir o trabalho, economiza tempo, corta gastos e, além disso, gera uma quantidade muito maior de informações que métodos tradicionais de levantamentos de solo.

Devido às características de propagação das ondas emitidas pelo GPR, muitos estudos têm sido conduzidos no sentido de identificar padrões de umidade do solo e de comportamento da água subsuperficial (Overmeeren et al., 1997). Por meio de medições realizadas com GPR, reflectometria no domínio do tempo (*time domain reflectometry* – TDR) e mensuração direta da umidade gravimétrica do solo, Huisman et al. (2001) afirmaram que o GPR também pode ser utilizado na estimativa da umidade do solo. Os autores demonstraram que a calibração entre as medições realizadas com o GPR e a umidade gravimétrica assemelharam-se àquelas obtidas para as medições com o TDR. Assim, concluíram que a acurácia das medições de umidade realizadas com o GPR são comparáveis àquelas realizadas com o TDR.

A localização do lençol freático pode ser, muitas vezes, claramente observada em radiogramas de camadas de areias grossas, cascalho e calcáreo poroso, devido a grande diferença de impedância entre os materiais saturados e não saturados (Knodel et al., 2007). Boll et al. (1996) utilizaram o GPR para detecção de camadas de diferentes granulometrias no solo utilizando as características de propagação da água nestes diferentes meios. Doolittle et al. (2006) utilizaram o GPR para mapear variações espaciais e temporais do lençol freático e dos padrões de fluxo de água subterrânea em um aquífero não confinado localizado abaixo de uma paisagem eólica. Comparando o resultado com aquele obtido através de poços de monitoramento, Doolittle et al. (2006) concluíram que as observações realizadas com o GPR forneceram uma cobertura mais abrangente e mapearam padrões de fluxo de água subterrânea mais detalhadamente. Além disso, através destas observações, foi revelado um padrão sistemático temporal e espacial para as variações do lençol freático e para o fluxo de água subterrânea.

Neste âmbito, o GPR também encontra respaldo em aplicações na hidrologia, tais como a identificação de formação de fluxos preferenciais e conectividade hidrológica, devido à capacidade de diferenciação de materiais com diferentes umidades e, principalmente por ser um método não destrutivo. Holden et al. (2002) usaram o GPR para mapear a ocorrência de cavidades (possivelmente vinculadas a formação de *pipes*) na subsuperfície. Apenas os *pipes* com diâmetro menor que 10 cm e aqueles situados a profundidades muito rasas (até 10-20 cm) não puderam ser identificados com o GPR. Mesmo assim, esta incapacidade em identificá-los foi atribuída à configuração do sistema (frequência característica da antena). Assim, estes autores concluíram que a densidade de *pipes* identificados a partir do GPR pode ser muito maior do que quando utilizados métodos tradicionais de observação.

Holden (2004) utilizou o GPR para detectar a formação de cavidades na subsuperfície e a existência de conectividade hidrológica entre diferentes cavidades (formação de *pipes*), empregando cloreto de sódio como traçador. O estudo foi conduzido através do levantamento com GPR das cavidades que encontravam-se a jusante do ponto utilizado para injeção do traçador, na tentativa de identificar variações na condutividade elétrica.

Na agronomia, o GPR também tem sido utilizado para o mapeamento de sistemas de raízes de plantas. Hruska et al. (1999) aplicaram o GPR

em sua área de estudo e determinaram a densidade de raízes em diferentes profundidades além da profundidade máxima alcançada no processo de enraizamento. Com uma finalidade similar, Butnor et al. (2001) aplicaram o GPR para uma vasta gama de condições de solos dos Estados Unidos. Em cada local foram testadas antenas com diferentes frequências (400 MHz a 1,5 GHz), na intenção de determinar a capacidade do GPR em detectar raízes, solos orgânicos, tamanho das raízes e biomassa radicular. Os melhores resultados foram encontrados em solos arenosos excessivamente drenados, enquanto que solos com alto teor de água e argila reduziram drasticamente a resolução das imagens e a profundidade de observação. Assim, concluíram que a utilidade do GPR para mapear a existência de raízes depende das condições específicas locais. Então, pode-se dizer que, em solos secos arenosos, há possibilidade de aquisição satisfatória de dados, enquanto que, em solos úmidos argilosos, a visualização das raízes fica comprometida.

Devido à capacidade em detalhar informações subsuperficiais, o GPR pode ser utilizado para definir a localização da interface entre dois materiais de propriedades diferentes. Justamente por isso, pode ser utilizado para mapeamento da profundidade do solo. Xu et al. (2012) utilizaram o GPR como uma alternativa de maior rapidez e eficiência e de menor custo para estimativa da espessura de aterros próximos à cidade de Pequim, China.

Howe (2000) realizou o levantamento de 32 seções com GPR com a finalidade de definir a espessura do solo e incorporar a distribuição espacial do solo em um modelo hidrológico distribuído. O autor encontrou um erro médio de aproximadamente 10 cm entre dados estimados através do GPR e medidos através de furos de sondagem. O autor ressalta que, embora a aplicação do GPR tenha sido bem sucedida, ao menos uma medição mecânica é necessária para avaliar as estimativas obtidas com a GPR e verificar se a espessura estimada coincide com a medida.

Roering et al. (2010) realizaram uma análise do papel das árvores nas modificações topográficas e da conversão da rocha matriz em solo em uma bacia montanhosa florestada. Utilizando o GPR, os autores mapearam, além da profundidade do solo na encosta, a profundidade até a qual as raízes penetravam na rocha matriz. Mostrando a penetração das raízes na rocha, os autores comentaram sobre a importância biogênica na pedogênese. Além disso, ao analisar a variação da profundidade do solo, os autores demonstraram a influência da vegetação não

somente nas características topográficas superficiais como também nas subsuperficiais, já que a profundidade variou de acordo com a densidade e alcance das raízes.

Em outra aplicação do GPR em ambientes declivosos (montanhosos), Cassiani et al. (2006) estimaram a profundidade e a umidade do solo para uma bacia no norte da Itália. Os dados gerados trazem informações sobre a morfologia superficial da rocha matriz, além do grau de fraturação da parcela fraturada. Os autores ainda salientaram a dificuldade na interpretação de dados de GPR extraídos em superfícies declivosas.

A avaliação da espessura de solos orgânicos e turfeiras (solos geralmente sedimentares, localizados em áreas de várzeas e com alto teor de matéria orgânica) através do uso do GPR também já foi objeto de estudo. Shih e Doolittle (1984) realizaram um dos trabalhos pioneiros na tentativa de utilizar o GPR para definição de camadas específicas do solo. Obtiveram êxito na tarefa de determinar a profundidade do solo orgânico ao comparar os resultados obtidos com GPR e aqueles obtidos através de furos de sondagem e obter erros mínimos. Proulx-McInnis et al. (2013) também compararam espessuras de turfeiras obtidas com o GPR e métodos mecânicos tradicionais, obtendo forte correlação. No entanto, estes autores chamam a atenção para o aumento do erro obtido através do GPR em zonas de grande acumulação de água devido a atenuação do sinal do aparelho nestes locais.

Considerações finais

A profundidade do solo é um dos parâmetros de mais difícil estimativa e suas variações temporal e espacial ainda não são completamente compreendidas pela comunidade científica. Ademais, este é um parâmetro que exerce controle sobre processos pedológicos, geomorfológicos e hidrológicos, e, justamente por isso, é essencial para a aplicação de inúmeros modelos (hidrológicos, de estabilidade de encostas e de evolução da paisagem, entre outros). Desta maneira, o estudo e desenvolvimento de técnicas para estimativa deste parâmetro é uma importante tarefa que ainda está em desenvolvimento.

O presente trabalho é o primeiro de dois artigos que realizam uma extensa revisão de métodos de estimativa da profundidade do solo. Neste trabalho, além de um esclarecimento acerca dos termos utilizados para se referir ao solo, foram descritos os métodos de campo para estimativa deste parâmetro, sendo que estes foram divididos em métodos de referência e métodos

geofísicos. Os métodos de campo geralmente geram informações pontuais ou relativas a perfis do solo. O método de referência, embora sendo o mais rudimentar dentre eles, sempre deve ser conduzido a fim de validar as informações geradas através dos demais métodos, sejam eles de geofísicos ou matemáticos. Isso fica evidenciado pela constatação de que mesmo os trabalhos desenvolvidos através das técnicas mais atuais ainda necessitam de dados de referência para confirmação.

Diversos métodos de exploração geofísica podem ser utilizados para a estimativa da profundidade do solo. Cada método demonstra características específicas de aplicação, detalhamento de informações e determinadas limitações. Porém, os métodos geofísicos eletromagnéticos, através do GPR, apresentam uma grande aplicabilidade atualmente. Além disso, passam constantemente por avanços, tornando-os ainda mais promissores. A possibilidade de empregar diferentes antenas, com diferentes alcances, permite o uso do GPR para diversas finalidades no estudo do solo. A habilidade do método em identificar formas na subsuperfície permite que este seja utilizado no mapeamento de estruturas de diversos tamanhos. As limitações do método referem-se principalmente a atenuação do sinal ocasionado pela presença de água, que limita o alcance e a quantidade de observações que podem ser extraídas de uma imagem.

Entretanto, por mais promissor e eficaz que sejam as técnicas de campo de estimativa da profundidade do solo, atualmente estas estão limitadas a informações pontuais ou relativas a áreas limitadas. Nos processos de modelagem hidrológica e de estabilidade de encostas, por exemplo, é necessário que os valores de profundidade do solo sejam estimados para áreas maiores, por exemplo, bacias hidrográficas. Assim, os métodos de campo podem ser utilizados para validar outros métodos de estimativa da profundidade do solo capazes de gerar informações para toda a área, isto é, os matemáticos. No segundo artigo que compõe este trabalho (Michel e Kobiyama, submetido) será apresentado o estado da arte referente aos métodos matemáticos de estimativa da profundidade do solo.

Referências

- Abidin, M. H. Z.; Saad, R.; Ahmad, F.; Wijeyesekera, C.; Baharuddin, M. F. T., 2012. Seismic refraction investigation on near surface

- landslides at the Kundasang area in Sabah, Malaysia. *Procedia Engineering* 50, 516-531.
- Al-saigh, N. H.; Al-dabbagh, T. H., 2010. Identification of landslide slip-surface and its shear strength: A new application for shallow seismic refraction method. *Journal of the Geological Society of India* 76, 175–180.
- Anomohanran, O., 2013. Seismic Refraction Method: a Technique for Determining the Thickness of Stratified Substratum. *American Journal of Applied Sciences* 10, 857–862.
- Assaad, F. A., 2009. Surface Geophysical Petroleum Exploration Methods, in: Assaad, F. A. (Org.), *Field Methods for Petroleum Geologists*. Springer, Heidelberg, pp. 21-23.
- Assaad, F.; Lamoreaux, P.; Hughes, T., 2004. *Field methods for geologists and hydrogeologists*, Springer Heidelberg.
- Barsé, L.; Sentinger, M. F.; Gorelik, B.; Duarte, S. L. C.; Salvadoretti, P.; Costa, J. F. C. L.; Koppe, C. J., 2011. Determinação da espessura do manto de intemperismo utilizando sísmica de refração rasa na área de Seival – RS, in: 3º Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2011, Gramado. Anais, pp. 1-10.
- Becker, G. F., 1895. Gold Fields of the Southern Appalachians, in: U.S. Geological Survey, 16th Annual Report pt. 3, pp. 251 – 331.
- Bell, M. A.; Fischer, R. A., 1993. Guide to soil measurements for agronomic and physiological research in small grain cereals, in: CIMMYT Wheat Special Report (WPSR), Mexico, pp. 1-40.
- Beres, M. J.; Haeni, F. P., 1991. Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. *Ground Water* 29, 375–386.
- Bery, A. A., 2013. High Resolution in Seismic Refraction Tomography for Environmental Study. *International journal of Geosciences* 4, 792–796.
- Boll, J.; Van, R.; Weiler, K.; Ewen, J. A.; Daliparthi, J.; Hebert, S. J.; Steenhuis, S. T., 1996. Using ground-penetrating radar to detect layers in a sandy field soil. *Geoderma* 70, 117–132.
- Borga, M.; Dalla Fontana, G.; Gregoretto, C.; Marchi, L., 2002. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. *Hydrological Processes* 16, 2833–2851.
- Butler, D. K.; Llopis, J. L.; Dobecki, T. L.; Wilt, M. J.; Corwin, R. F.; Olhoeft, G., 1990. Comprehensive geophysical investigation of an existing dam foundation. (Part 2). *Geophysics: The Leading Edge of Exploration* 9, 44 – 53.
- Butnor, J. R.; Doolittle, J. A.; Kress, L.; Cohen, S.; Johnsen, K. H., 2001. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree physiology* 21, 1269–1278.
- Cassiani, G.; Strobbia, C.; Giustiniani, M.; Fusi, N.; Crosta, G.B.; Frattini, P., 2006. Monitoring of hydrological hillslope processes via time-lapse ground-penetrating radar guided waves. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 47, 125–144.
- Catani, F.; Segoni, S; Falorni, G., 2010. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale, *Water Resources Research* 46, 1–15, W05508.
- Conyers, L. B., 2013. *Ground Penetrating Radar for Archaeology*, 3 ed. AltaMira Press, Walnut Creek, CA.
- Daniels, R. B.; Hammer, R. D., 1992. *Soil Geomorphology*, John Wiley & Sons, New York.
- Davis, J. L.; Annan, A. P., 1989. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37, 531–551.
- De Vita, P.; Agrello, D.; Ambrosino, F., 2006. Landslide susceptibility assessment in ash-fall pyroclastic deposits surrounding Mount Somma-Vesuvius: Application of geophysical surveys for soil thickness mapping. *Journal of Applied Geophysics* 59, 126–139.
- Dietrich, W. E.; R. Reiss; M. L. Hsu; Montgomery, D. R., 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes* 9, 383-400.
- Dietrich, W. E.; Bellugi D.; Heimsath A. M.; Roering J. J.; Sklar, L.; Stock, J. D., 2003. Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics, in: Wilcock, P.; Iverson, R. (Org.), *Prediction in Geomorphology*, Geophysical Monograph Series, AGU, Washington D.C.

- Dolan, J. F.; Pratt, T. L., 1997. High-resolution seismic reflection profiling of the Santa Monica Fault Zone, West Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters* 24, 2051–2054.
- Doolittle, J. A., 1987. Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys, in: Reybold, W. U.; Petersen, G. W. (Org.), *Soil Surveys Techniques*, Soil Science Society of America, Madison, pp. 11-32.
- Doolittle, J. A.; Jenkison, Hopkins, B. D.; Ulmer, M.; Tuttle, W., 2006. Hydrogeological investigations with ground-penetrating radar (GPR): Estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse-textured soils. *Geoderma* 131, 317–329.
- Driscoll, F. G., 1986. *Groundwater and Wells*, 2 ed. Johnson Division, St. Paul.
- Eggleton, R. A., 2001. *The regolith glossary: surficial geology, soils and landscapes*, CRC Leme, Canberra and Perth.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. *Sistema brasileiro de classificação de solos*, 2 ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.
- Finkl, C. W., 2008. Saprolite, regolith and soil, in: Chesworth, W. (Org.). *Encyclopedia of Soil Science*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 614-622.
- Fu, Z.; Li, Z.; Cai C.; Shi, Z.; Xu, Q.; Wang, X., 2011. Soil thickness effect on hydrological and erosion characteristics under sloping lands: A hydrogeological perspective. *Geoderma* 167-168, 41-53.
- Gedroiz, K. K., 1927. Soil-absorbing complex and the absorbed soil cations as a basis of genetic soil classification, *Nossov Agr. Expt. Sta., Leningrad*.
- Guthrie, R. L.; Witty, J. E., 1982. New designations for soil horizons and layers and the new Soil Survey Manual. *Soil Science Society of America Journal* 46, 443-444.
- Haeni, F. P. 1988. Application of seismic-refraction techniques to hydrologic studies. U.S. Geological Survey, *Techniques of Water-Resources Investigations*, book 2, chap. D2.
- Hammond, C.; Hall, D. E.; Miller, S.; Swetik, P., 1992. *Level I Stability Analysis (LISA)*. Documentation for Version 2.0. General Technical Report INT-285. Ogden: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- Herzig, L. R.; Camargo, C. M. A. M., 2004. Refração Sísmica Rasa Aplicada No Projeto Integrado "West Suriname", in: *I Simpósio Brasileiro de Geofísica*, 2004, São Paulo. Anais.
- Holden, J., 2004. Hydrological connectivity of soil pipes determined by ground-penetrating radar tracer detection. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 437–442.
- Holden, J.; Burt, T. P.; Vilas, M., 2002. Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 235–249.
- Hough, B. K., 1957. *Basic Soils Engineering*, The Ronald Press Company, New York.
- Howe, A., 2000. *Ground Penetrating Radar for the parameterisation of subsurface hydrological properties*. Tese (Doutorado). London, Department of Geography, King's College.
- Hruska, J.; Cermák, J. A. N.; Sustek, S., 1999. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology* 19, 125–130.
- Huisman, J. A.; Sperl, C.; Bouten, W.; Verstraten, J. M., 2001. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology* 245, 48–58.
- Hunt, C. B., 1967. *Physiography of the United States*, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Hunter, J. A., 1984. Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph—Some simple techniques. *Geophysics* 49(8), 1381.
- Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*, McGraw-Hill, New York.
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3 ed. Blackwell Science LTD, Oxford, UK.
- Khan, M. Y., 2013. *Engineering Geophysical Study of Unconsolidated Top Soil Using Shallow Seismic Refraction and Electrical Resistivity*

- Techniques. *Journal of Environment and Earth Science*. 3, 120–128.
- Knödel, K., Lange, G., Voigt, H.-J., 2007. *Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies*, Springer, Berlin.
- Lavergne, M., 1989. *Seismic Methods*, Éditions Technip, Paris.
- Liu, J.; Chen, X.; Lin, H.; Liu, H.; Song, H., 2013. A simple geomorphic-based analytical model for predicting the spatial distribution of soil thickness in headwater hillslopes and catchments. *Water Resources Research* 49, 7733–7746.
- McBratney, A. B.; Mendonça, M. L. S.; Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- Merrill, G. P., 1897. *A Treatise on Rocks, Rock-Weathering and Soils*, The MacMillan Company, New York.
- Meyer, M. D.; North, M. P.; Gray, A.N.; Zald, H. S. J., 2007. Influence of soil thickness on stand characteristics in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Plant and Soil* 294, 113–123.
- Michel G. P.; Kobiyama M., (submetido). Estimativa da profundidade do solo: Parte 2 – Métodos matemáticos. *Revista Brasileira de Geografia Física*.
- Michel, G. P., 2013. Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação. 2013. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- Michot, D.; Benderitter, Y.; Dorigny, A.; Nicoulaud, B.; King, D.; Tabbagh, A., 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research* 39, 1-20.
- Milsom, J.; Eriksen, A., 2011. *Field Geophysics*, 4 ed. John Wiley & Sons LTD, Chichester, UK.
- Pelletier, J. D.; Rasmussen, C., 2009. Geomorphically based predictive mapping of soil thickness in upland watersheds. *Water Resources Research* 45, 1–15.
- Piegari, E.; Cataudella, V. Di Maio, R.; Milano.; Nicodemi, M.; Soldovieri, M. G., 2009. Electrical resistivity tomography and statistical analysis in landslide modelling: A conceptual approach. *Journal of Applied Geophysics* 68, 151–158.
- Proulx-Mcinnis, S.; St-Hilaire, A.; Rousseau, A. N.; Jutra, S., 2013. A review of ground-penetrating radar studies related to peatland stratigraphy with a case study on the determination of peat thickness in a northern boreal fen in Quebec, Canada. *Progress in Physical Geography* 37, 767–786.
- Reynolds, J. A., 1997. *Introduction to Applied Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons LTD, Chichester, UK.
- Roering, J. J.; Marshall, J.; Booth, A. M.; Mort, M.; JIN, Q., 2010. Evidence for biotic controls on topography and soil production. *Earth and Planetary Science Letters* 298, 183–190.
- Rooney, D.J.; Lowery, B., 2000. A profile cone penetrometer for mapping soil horizons. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2136-2139.
- Saarenketo, T.; Scullion, T., 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 43, 119–138.
- Samouëlian, A.; Cousin, I.; Richard, G.; Tabbagh, A.; Brund, A., 2003. Electrical Resistivity Imaging for Detecting Soil Cracking at the Centimetric Scale. *Soil Science Society of America Journal* 67, 1319-1326.
- Samouëlian, A.; Cousin, I.; Tabbagh, A.; Brund, A.; Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research* 83, 173-193.
- Schaetzl, R. J.; Anderson, S. N., 2005. *Soils Genesis and Geomorphology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Schultz, J. J., 2007. Using Ground-Penetrating Radar to Locate Clandestine Graves of Homicide Victims/ Forming Forensic Archaeology Partnerships With Law Enforcement. *Homicide Studies* 11, 15–29.
- Segoni, S.; Rossi, G.; Catani, F., 2012. Improving basin scale shallow landslide modelling using reliable soil thickness maps, *Natural Hazards* 61, 85–101.

- Seidel, K.; Lange, G., 2007. Direct Current Resistivity Methods. *Environmental Geology* 4, 205–237.
- Shaw, C. F., 1927. Report of committee on soil terminology. *American Soil Survey Association Bulletin* 8, 66-98.
- Sheehan, J. R.; Doll, W. E.; Mandell, W. A., 2005. An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 10, 21–34.
- Shih, S. F.; Doolittle, J. A., 1984. Using Radar to Investigate Organic Soil Thickness in the Florida Everglades. *Soil Science Society of America Journal* 48, 651-656.
- Simonson, R. W., 1968. Concept of soil. In: Norman, A. G (Org.). *Advances in Agronomy*, Academic Press, New York and London, pp. 1-47.
- Sun, Y.; Cheng, Q.; Lin, J.; Schellberg.; Lammers, P. S., 2013. Investigating soil physical properties and yield response in a grassland field using a dual-sensor penetrometer and EM38. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176, 209–216.
- Tabbagh, A.; Dabas, M.; Hesse, A.; Panissod, C., 2000. Soil resistivity: A non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma*, 97, 393–404.
- Tesfa, T. C.; Tarboton, D. G; Chandler, D. G; McNamara, J. P., 2009. Modeling soil depth from topographic and land cover attributes. *Water Resources Research*, 45, 1-16, W10438.
- USDA – U.S. Department of Agriculture, 1993. *Soil survey manual*. Soil Survey Division Staff, Washington, DC.
- Van Overmeeren, R. .; Sariowan, S. .; Gehrels, J., 1997. Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content; results of comparative measurements at two test sites. *Journal of Hydrology*, 197, 316–338.
- Vaughan, C. J., 1986. Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics*, 51(3), 595–604.
- Vaz, P. M. C.; Hopmans, J. W., 2001. Simultaneous Measurement of Soil Penetration Resistance and Water Content with a Combined Penetrometer – TDR Moisture Probe. *Soil Science Society of America Journal* 65, 4–12.
- Wu, W.; Sidle, R. C., 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research* 31, 2097-2110.
- Xu, X.; Peng, S.; Xiao, W.; Yu, Y., 2014. Measuring soil layer thickness in land rearrangement with GPR data. *Measurement Science and Technology* 25, 1-10.
- Xu, X.; Wang, F.; Xin, K.; Fu, X., 2012. Soil Layer Thickness Detection in Land Rearrangement Project by Using GPR Data. In: *International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 2012, Shanghai. *Proceedings*, pp. 387–392.