

Capítulo 7

USO DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA NA ANÁLISE DE UMIDADE DOS SOLOS

Patrícia de Araújo Romão
Tatiana Diniz Gonçalves
Newton Moreira de Souza

1. INTRODUÇÃO

A cartografia geotécnica, ao disponibilizar informações referentes aos fenômenos associados à superfície terrestre, constitui-se em importante instrumento de planejamento e implantação de obras civis, principalmente na fase de pré-projeto. Dentre os atributos relacionados ao comportamento geotécnico dos solos tropicais, as condições de umidade são passíveis de identificação, reconhecimento e medição em superfície e em subsuperfície, sendo possibilitado assim, o seu mapeamento espacial e temporal.

Nesse contexto, no presente capítulo são abordadas inicialmente, de maneira sucinta, as características pedológicas, geomorfológicas (capítulo 3, capítulo 4 e capítulo 6) e climáticas (capítulo 14), que influenciam as condições de umidade dos solos. Os diversos métodos de reconhecimento, medição e mapeamento da umidade dos solos são discutidos a seguir, principalmente aqueles aplicados a grandes áreas, que em geral fazem uso de tecnologias atuais. Ao final deste capítulo, são apresentados exemplos e sugestões de representação das propriedades em questão, por meio de cartas e mapas geotécnicos e modelos tridimensionais.

2. FATORES ASSOCIADOS À VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DO TEOR DE UMIDADE DOS SOLOS

Conforme já discutido nos capítulos anteriores, as características climáticas das regiões intertropicais no território brasileiro, atuando sobre o arcabouço geológico, associam-se à existência de extensas superfícies aplainadas, compostas por solos de espessuras variadas, com predomínio de espessos mantos de alteração. Assim, nessas regiões predominam em superfície e subsuperfície, solos em condições não saturadas, os quais necessitam ser conhecidos e mapeados.

Essas características podem ser qualificadas e/ou quantificadas a partir de levantamento de campo ou de documentação cartográfica existente, ou a partir de ambos, respei-

tando-se a escala do mapeamento, pois as informações representadas possuem uma generalização cartográfica definida de acordo com essa escala.

Dessa forma, os fatores naturais que condicionam o comportamento hídrico dos solos são listados a seguir, de modo a apontar as características que podem ser mapeadas, quanto à sua variação espaço temporal.

Segundo Dobos e Hengl (2009), foi Dokuchaev, um cientista dos solos russo, que em 1898 foi o primeiro a identificar que o clima, os organismos, o relevo ou a topografia, o material parental e o tempo são os principais fatores na formação dos solos. Jenny (1941) buscou desenvolver os conceitos de Dokuchaev e propôs que esses fatores poderiam servir para estimar características químicas físicas e biológicas do solo em um determinado local onde as propriedades do solo dependem de sua posição geográfica e condições de vizinhança.

2.1 Fatores climáticos

As características climáticas regionais e locais, fundamentais na análise da umidade dos solos devem ser avaliadas e mapeadas, dependendo da extensão, da escala e do recorte temporal do mapeamento. É possível citar, como abordado no capítulo 14, a influência do microclima e/ou das condições climáticas regionais, que geram específicas condições de umidade na interface solo-atmosfera, com variações espaciais e sazonais.

Além disso, no caso específico de solos não saturados, é importante destacar o comportamento hídrico dos solos, por exemplo, após longos períodos de estiagem, no início das primeiras chuvas. Borghetti *et al.* (2007), mencionando fatos similares, observaram em solos arenosos, que o fluxo de água descendente é facilitado quando ocorre o aumento da umidade, pois a tendência do fluxo é a percolação por caminhos mais úmidos.

Nos solos argilosos, no entanto, se por um lado o potencial de retenção de água da superfície das partículas tende a diminuir com o aumento da umidade, facilitando o fluxo subsuperficial, por outro lado, ele contribui para a redução da sucção matricial, o que tende a gerar uma redução nesse fluxo. Outro aspecto relevante diz respeito à possibilidade de oclusão da fase ar, o que também tende a gerar uma obstrução do fluxo. Essa oclusão depende da umidade do solo. Portanto, as variações climáticas, embora outros fatores intervenham, modificam as condições de umidade, de fluxo subsuperficial e de percolação da água através do solo, estabelecendo, por vezes, uma dinâmica favorável à ocorrência de processos como os erosivos e de inundação, os quais não dependem tão somente da quantidade de precipitação, mas também de sua distribuição, associada principalmente à intensidade das chuvas.

Diversas características climáticas podem ser analisadas e mapeadas na interface solo-atmosfera, quanto à relação entre as condições climáticas e a umidade dos solos, nas regiões intertropicais. Tais características que traduzem essa relação na interface são principalmente,

- a) a demanda e a oferta de precipitação;
- b) a temperatura e umidade relativa do ar; e
- c) a direção dos ventos e da radiação solar.

A temperatura do solo e a evapotranspiração são outras importantes propriedades que devem ser levadas em conta, na análise das variações de umidade dos solos (Luiz, 2012).

2.2 Fatores geológicos e pedológicos

A distribuição dos tipos de rochas e solos em superfície e em subsuperfície determina a existência de materiais com diferentes condições de umidade. Esses materiais ocorrem em correspondentes condições físico-químicas, que comandam o movimento de água nos poros, condições essas devidas a sua diversidade mineralógica e química; ao tamanho, forma e ao arranjo das partículas e de seus poros, quanto às micro e macro porosidades (Klein e Libardi, 2002; Castro *et al.*, 2003; Souza *et al.* 2006; Toma *et al.* 2013). Também interferem nessas condições, o grau de intemperismo e a origem dos materiais inconsolidados. Ou ainda, a distribuição e o arranjo das descontinuidades existentes no maciço.

Outras características não menos importantes, e que também interferem na condutividade hidráulica nos solos são abordadas nos outros capítulos mais detalhadamente. Uma delas é a interferência do manejo do solo, modificando, essencialmente, a estrutura do solo. Ainda podem ser citadas aquelas associadas à ocorrência de fenômenos naturais que influenciam a macroestrutura, como é o caso de escavações realizadas pela meso e macrofauna, a decomposição das raízes, além da própria existência de vegetação, modificando a drenagem nos horizontes próximos à superfície.

A investigação direta ou de documentação cartográfica e bibliográfica existente auxilia no reconhecimento da distribuição espacial dos materiais inconsolidados. Pois o mapeamento desses materiais permite, dentre outros, a observação e a realização de correlações com as forças de percolação, com as condições de fluxo superficial e subsuperficial, com a profundidade do nível freático e com a espessura dos horizontes não saturados (zona ativa).

Desse modo, destacam-se dentre as que podem ser avaliadas, reconhecidas e mapeadas, as seguintes características:

- a) as espessuras e as características dos materiais inconsolidados (incluindo, a composição química e mineralógica, a textura e a estrutura);
- b) o grau de intemperismo e as condições de formação dos materiais (*in situ* ou a partir de solos transportados);
- c) as características do substrato rochoso (incluindo principalmente a litologia e a estrutura); e
- d) a espessura da zona ativa, associada à profundidade do nível freático.

2.3 Fatores associados às formas do relevo

Dentre as características geomorfológicas, a forma da superfície terrestre consiste em uma das feições que podem ser facilmente reconhecidas, identificadas e mapeadas. O relevo da superfície nas regiões intertropicais reflete as condições dos materiais terrestres, que foram submetidos à ação das intempéries, relacionadas ao clima atual e pretérito.

Por sua vez, a configuração da superfície condiciona os processos geológicos associados à dinâmica externa atual. Esses processos, no território brasileiro, são mais atuantes em detrimento daqueles relacionados à dinâmica interna. Os processos da dinâmica externa são comandados pela ação das forças climáticas e gravitacionais, considerando-se as características pedológicas, geológicas e morfológicas (capítulo 3 e capítulo 4).

Dentre as características do relevo, que podem ser mapeadas, destacam-se:

- a) os atributos simples que descrevem as vertentes como a altitude, o gradiente (as declividades), a orientação, o comprimento e as curvaturas (Evans, 1972); e
- b) os atributos combinados, como o índice topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index - TWI*) e a altura relativa acima da drenagem mais próxima – *Height Above the Nearest Drainage - HAND*.

Uma vez que estejam disponíveis dados contendo os valores de elevação de determinado local da superfície terrestre, é possível o cálculo de atributos altimétricos, bem como a modelagem de atributos combinados. Atributos combinados, como o índice topográfico de umidade e a altura relativa acima da drenagem mais próxima, em geral, correlacionam-se à distribuição de umidade ao longo de um perfil topográfico e à profundidade do nível freático.

Dependendo da escala, os valores de elevação encontram-se disponíveis como dados altimétricos primários, os quais podem ser acessados e modelados a partir de imagens de relevo ou ainda de cartas topográficas em formato digital.

A análise da distribuição espacial do índice elementar altitude pode ser utilizada como base para a compartimentação do terreno. Por exemplo, em uma topossequência, a espessura de determinados materiais correlaciona-se a superfícies com maiores frequências de determinadas altitudes, definindo compartimentos topográficos (Romão, 2006).

Comumente descrito como declividade, a variação da altitude com a distância, ou seja, a primeira derivada da elevação corresponde ao gradiente do relevo, ou seja, ao ângulo que a vertente faz com a horizontal. Essa variação pode ser calculada pelo ângulo entre a reta de maior inclinação e uma linha horizontal, na mesma direção da reta, isto é, perpendicular à curva de nível.

Os atributos referentes ao gradiente podem ser utilizados para a estimativa da energia cinética, relacionada à velocidade do escoamento superficial. Quanto maior a declividade, maior a velocidade da água de escoamento superficial e menor a probabilidade de infiltração da água.

A exposição ou orientação das vertentes (componente direcional do gradiente) é o ângulo que a reta de maior inclinação faz com o Norte, tendo como referência o sentido onde os valores altimétricos diminuem. Dependendo do ângulo de exposição da vertente, modificam-se tanto as condições de chegada da água e de escoamento superficial quanto as de incidência da radiação solar nessa vertente. Tal fato interfere tanto na atuação da gota de água da chuva e de seu escoamento superficial quanto na quantidade de energia solar que incide na superfície ao longo do dia e sazonalmente, influenciando, assim, as condições de umidade dos solos, em superfície e subsuperfície.

Em geral, as inclinações do terreno variam ao longo da reta de maior inclinação, bem como a orientação das vertentes modifica-se de acordo com sua conformação ao longo de

uma curva de nível. Essa variação corresponde, respectivamente, à curvatura da vertente medida ao longo das maiores inclinações (curvatura vertical ou do perfil) e à curvatura da vertente medida na curva de nível – curvatura horizontal ou plana.

O mapeamento da curvatura do perfil medida no plano vertical permite a análise da vertente quanto à estimativa da aceleração ou desaceleração do fluxo de água no escoamento superficial. Uma curvatura convexa, ou seja, cujo ângulo de inclinação aumenta da parte mais alta para a mais baixa, reflete em condições de aceleração das águas de escoamento superficial e de aumento da energia para o transporte de sedimentos. No caso da curvatura côncava, ocorre o contrário, e, como o ângulo de inclinação diminui ao longo da descida da vertente, existe a tendência de desaceleração do fluxo de água superficial e a consequente condição de deposição de sedimentos com essa desaceleração.

Quanto às medidas de curvatura horizontal, observa-se que existe a tendência de divergência ou concentração de fluxo, dependendo da curvatura plana medida ao longo da curva de nível, se a conformação da curva no plano horizontal corresponde a linhas divergentes ou convergentes, respectivamente.

Já o comprimento da vertente, pode ser entendido como o comprimento do fluxo de água em superfície, desde o início de sua formação, até o ponto em que ocorre uma mudança significativa das condições do fluxo de água superficial. Um exemplo típico dessa modificação é o encontro desse fluxo com uma calha de drenagem ou com uma topografia que facilite a quebra de energia (Valeriano, 2002; Trentin e Robaina, 2005). Nesse último caso, ocorrem condições mais favoráveis à infiltração da água do que ao escoamento superficial. Por outro lado, quanto maior o comprimento de atuação do fluxo sobre a vertente, maior é a probabilidade de transporte de sedimentos, considerando que os outros atributos da vertente tenham-se mantido constantes.

O *Índice Topográfico de Umidade - TWI*, também denominado *Índice Topográfico Composto - CTI* (Moore *et al.*, 1991; Quinn *et al.*, 1995; McKenzie e Ryan, 1999; Batista, 2014) representa uma estimativa do acúmulo de fluxo em um ponto do terreno e pode ser definido como (Equação 1):

$$TWI = \ln (A_c / \tan \theta) \quad (\text{Eq. 1})$$

onde, A_c = área de contribuição específica, expressa em m^2 por unidade de largura ortogonal à direção de fluxo, em metros (proporcional à capacidade da área de acumular fluxo); e $\tan \theta$ = declividade ou gradiente da vertente (proporcional à capacidade da vertente de escoar fluxo).

O *TWI* tem sido correlacionado à distribuição espacial da umidade, principalmente identificando áreas em que ocorre a saturação superficial, como é o caso dos solos hidromórficos, que ocorrem em relevo plano, em áreas alagadas, ou seja, que possuem o nível freático próximo ao da superfície, na maior parte do ano. Desse modo, esse índice aplica-se à separação desse tipo de solo daqueles que ocorrem em outras áreas planas e suavemente onduladas (Sirtoli *et al.*, 2008).

Destaca-se outro atributo combinado, associado aos desníveis existentes em uma superfície topográfica, o *HAND (Height Above the Nearest Drainage)*, também denominado altitude acima da linha do canal (Böhner e Antonic, 2009), o qual possui estreita rela-

ção com a energia potencial do relevo (potencial gravitacional), para que os processos da dinâmica externa ocorram. Esse índice tem sido utilizado por um grupo de pesquisas do INPE (INPE, 2010) e trata-se de um descritor de terreno, que quantifica a distância vertical ou a altura relativa em qualquer ponto do terreno à drenagem mais próxima.

Os valores disponibilizados pelo descritor *HAND* relacionam-se indiretamente com a profundidade do nível freático. Valores muito pequenos de altura relativa, tendendo a zero, indicam que o nível d'água está próximo à superfície, apresentando condições equivalentes a zonas saturadas. Já os valores altos indicam um nível freático profundo, ou seja, com maior probabilidade de corresponderem a áreas de solos não saturados, bem drenados (INPE, 2010; Nobre *et al.*, 2011).

3. MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO E PRINCIPAIS TECNOLOGIAS ASSOCIADAS AO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DO TEOR DE UMIDADE DOS SOLOS

Como mencionado anteriormente, o conhecimento da umidade do solo é fundamental para a descrição e o entendimento dos processos hídricos em zonas não saturadas do solo, pois influencia significativamente a troca de água e energia que ocorrem na interface solo-atmosfera.

O teor de umidade dos solos é altamente variável no espaço e no tempo. Variações espaciais de umidade vão de poucos centímetros a vários quilômetros, e temporais vão de minutos a anos. Devido à importância dessa variação de umidade do solo para numerosos estudos ambientais, incluindo pesquisas na área da meteorologia, hidrologia, agricultura e mudanças climáticas nas últimas décadas, muitas pesquisas, como as de Topp. *et al.* (1980); Wang e Qu (2009); Sanchez *et al.* (2010); Yichang *et al.* (2010); Vereecken *et al.* (2014), além de outros, têm sido realizadas no intuito de desenvolver métodos e técnicas que estimem o teor de umidade dos solos.

A umidade do solo pode ser mapeada *in situ* por meio de sensores remotos ou modelada por diversas técnicas. Entretanto, o monitoramento da umidade de solo em grandes áreas ainda é incipiente. Os recentes avanços tecnológicos em sensoriamento remoto têm mostrado que a umidade do solo pode ser mapeada por uma variedade de técnicas que se diferem em função da escala de mapeamento.

Métodos diretos *in situ* de mensuração de umidade do solo, como o gravimétrico, o tensiométrico, o de reflectometria no domínio do tempo (TDR) ou mesmo o de eletrorresistividade, podem ser considerados como métodos que se destinam a mapeamentos em escala local e são altamente restritivos, pois se baseiam em medições discretas (ponto a ponto) e não representam a distribuição espacial do teor de umidade do solo.

O mapeamento indireto, por meio de sensores remotos, é vantajoso à medida que fornece informações contínuas espacialmente e repetidas observações em intervalos de tempo regular. Além disso, os recentes avanços tecnológicos referentes aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm mostrado que a umidade do solo pode ser investigada, analisada e mapeada. Logo, é apresentada, a seguir, a investigação do teor de umidade por meio de recentes tecnologias associadas ao sensoriamento remoto e aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

3.1 Investigação do teor de umidade por meio de sensoriamento remoto

Diversos estudos têm demonstrado a utilidade do sensoriamento remoto para o mapeamento da variabilidade espaço temporal do teor de umidade do solo (Dubois *et al.*, 1995; Zribi *et al.*, 2005; Baghdadi *et al.*, 2007; Baghdadi *et al.*, 2012; Vivoni *et al.*, 2008; Sánchez *et al.*, 2010). O sensoriamento remoto utiliza sofisticados sensores que registram a quantidade de energia eletromagnética refletida de um objeto e posteriormente, usa algoritmos matemáticos e/ou estatísticos para extrair as informações desejadas (Jensen, 2009). As imagens geradas são utilizadas para estimar o teor de umidade do solo e podem ser obtidas tanto por sensores multiespectrais, quanto por sensores térmicos e de micro-ondas ativo e passivo.

As principais diferenças entre esses sensores são: o comprimento de onda do espectro eletromagnético que cada sensor detecta, o modo como os dados são registrados pelos sensores e a relação física entre os dados registrados e o teor de umidade do solo. Vale ressaltar que esses sensores não detectam o teor de umidade do solo de modo direto, sendo necessários modelos matemáticos que descrevem a relação entre o sinal detectado pelo sensor e o teor de umidade do solo.

Os sensores multiespectrais registram a radiação refletida do Sol a partir da superfície da Terra na faixa óptica do espectro eletromagnético ($\pm 0,4$ a $3\mu\text{m}$), isto é, os solos são registrados pelos sensores com base nas suas propriedades de reflectância espectral. Essa reflectância é função das características dos solos que incluem o tipo e a quantidade de constituintes orgânicos e minerais, a textura e a salinidade, a rugosidade e o conteúdo de umidade presentes no solo (Jensen, 2009).

Geralmente, um solo seco exibe um aumento de reflectância espectral em relação a um solo úmido devido, principalmente, à absorção por água nos interstícios de solos úmidos. Existe uma relação entre o tamanho das partículas do solo e a quantidade de água que o solo pode armazenar. Quanto mais fina a textura, maior a capacidade do solo de manter um alto teor de umidade quando ocorrem precipitações (Jensen, 2009). Nesse sentido, quanto maior a umidade do solo, maior será a adsorção da energia eletromagnética incidente e menor será a reflectância desse solo.

A umidade de solo estimada por sensores multiespectrais pode ser detectada pelas chamadas bandas de absorção de água (1,4; 1,9 e $2,7\mu\text{m}$), presentes no sensor *ETM* (*Enhanced Thematic Mapper*) do Landsat (Jensen, 2009) e no sensor *OLI* (*Operational Land Imager*) do Landsat 8, nas quais a umidade do solo absorve mais energia radiante incidente do que em regiões espectrais adjacentes. O resultado dessa absorção é o aparecimento de regiões denominadas de vales, característicos nas curvas de reflectância (Figura 1). Geralmente, imagens de sensores remotos de superfícies exposta de solos, obtidas em períodos chuvosos são significativamente mais escuras do que imagens obtidas em período de estiagem.

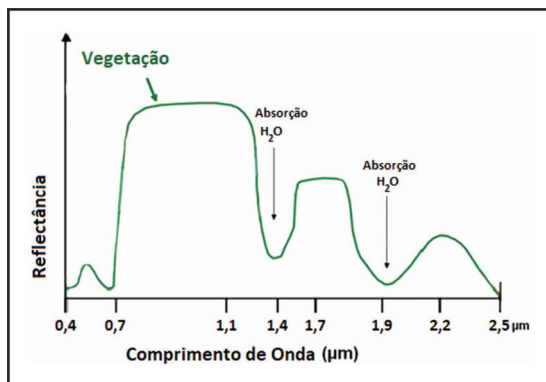


Figura 1 – Curva espectral padrão da vegetação mostrando os picos de absorção de água

Em regiões onde o imageamento por sensores multiespectrais dos solos é dificultado pela presença de cobertura vegetal, a utilização de índices como o de vegetação por diferença normalizada - *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o de vegetação ajustado do solo - *SAVI* (*Soil Adjusted Vegetation Index*) tem sido uma alternativa de análise da variabilidade espacial do teor de umidade do solo. Esses índices se baseiam na assinatura espectral da vegetação que varia a depender das condições de umidade. O *NDVI* é calculado a partir da razão entre a reflectância medida nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (Equação 2). Os valores de *NDVI* ocorrem no intervalo de -1 a +1, no qual valores mais altos, próximos a 1, são indicadores de vegetação mais exuberante e correlacionáveis a solos mais úmidos e férteis.

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: *NIR* = infravermelho próximo ($\pm 0,76$ à $0,90 \mu\text{m}$) e *R* = vermelho ($\pm 0,63$ à $0,70 \mu\text{m}$).

A variação da umidade do solo tem forte influência sobre as propriedades termais dos solos (Vereecken *et al.*, 2014). Quando há aumento do teor de umidade do solo, a condutividade termal no solo aumenta, haja vista que a água presente nos espaços intersticiais do solo tem condutividade termal muito maior do que o ar, que preenche esses espaços quando o solo está seco.

Trabalhos como o de Zeng *et al.* (2004), Zhan *et al.* (2004), Vivoni *et al.* (2008) e Yichang *et al.* (2010), têm utilizado índices como o *LST* (*Land Surface Temperature*) tanto para inferir a umidade de solo a partir da determinação da temperatura da superfície quanto para modelar algoritmos que correlacione o *LST* com a umidade do solo. O *LST* é obtido a partir do cálculo da temperatura radiométrica da superfície, que relaciona a emissividade e a temperatura do pixel de imagens do infravermelho termal.

Nas últimas décadas, o aumentado número de pesquisas voltadas para o mapeamento indireto da umidade de solo tem gerado uma multiplicidade de métodos, algoritmos e modelos empíricos e semi-empíricos baseados em sensoriamento remoto por micro-on-

das (Schmugge *et al.*, 1994; Ulaby *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 1999; Zribi *et al.*, 2005; Baghdadi *et al.*, 2007; Rossato, 2009; Jackson *et al.*, 2010; Baghdadi *et al.*, 2012).

O sensoriamento remoto por micro-ondas possui uma capacidade de estimar a umidade do solo por meio da medição da radiação eletromagnética na região de micro-ondas (0,5 à 100 cm). A base fundamental dos sensores de micro-ondas para detecção da umidade do solo é o grande contraste entre as propriedades dielétricas de água (~80) e as propriedades dielétricas das partículas do solo (<4). À medida que aumenta a umidade do solo, aumenta a constante dielétrica da água no solo, e essa alteração é detectada por sensores de micro-ondas. Tanto as técnicas de micro-ondas de sensoriamento remoto passivo quanto ativo demonstraram alta capacidade para monitoramento global das variações de umidade do solo (Vereecken *et al.*, 2014).

A variação da radiação térmica emitida está relacionada às diferenças na constante dielétrica do solo seco e solo úmido (Jensen, 2009). Na presença de vegetação, a relação direta entre temperatura de brilho e umidade do solo não é aplicável, pois devem ser considerados na interpretação da medida da temperatura de brilho: a absorção adicional, a emissão e a dispersão de radiação do dossel da vegetação (Chukhlantsev *et al.*, 2003). Nas frequências da radiação térmica, a intensidade de emissão é proporcional à temperatura termodinâmica do solo e à emissividade do solo, sendo, portanto, quantificada a partir da temperatura de brilho.

Sensores de micro-ondas ativos, tais como o radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*), representam, atualmente, a melhor opção para mapeamento espacial e temporal da umidade do solo em escalas de bacias hidrográficas, que variam de 1 000 a 25 000 km². A maioria dos estudos avaliou que os principais fatores que afetam a precisão da estimativa da umidade do solo são rugosidade da superfície e a biomassa da vegetação (Schmugge *et al.*, 2002).

A umidade do solo também influencia a profundidade de penetração da energia eletromagnética incidente. Se o solo tem alto teor de umidade, a energia incidente irá penetrar apenas poucos centímetros no solo e será mais fortemente espalhada na superfície; por outro lado, a energia de micro-ondas ativas pode penetrar mais profundamente em solos extremamente secos. Muitas pesquisas demonstraram que a profundidade de penetração das micro-ondas varia de 2 a 6 cm (Schmugge *et al.*, 2002).

São exemplos de sensores de micro-ondas espaciais para medições de umidade do solo o *Special Sensor Microwave Imager/Sounder - SSMIS*, a bordo do satélite intitulado *Defense Meteorological Satellite Program - DMSP*; o *Scanning Multichannel Microwave Radiometer - SMMR*, operado pelo satélite Nimbus-7; o *Soil Moisture Active Passive - SMAP*; o *Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager - TRMM-TMI*; e o *Advanced Microwave Scanning Radiometer - AMSR-E*, a bordo do satélite *Earth Observing Satellite* da missão *Aqua*.

3.2 Utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na análise espaço-temporal do teor de umidade

Os sistemas de informações geográficas (SIG) são ferramentas úteis ao mapeamento e à análise das variações espaço-temporais do teor de umidade do solo. Muitas aplicações

de SIG são voltadas ao desenvolvimento de modelos da integração e interpretação de dados de diferentes fontes. Entretanto, o principal desafio desses sistemas é entender como os parâmetros dos dados de entrada, suas variações e o modelo de representação desses dados afetam os resultados e as conclusões das análises de uma investigação.

O teor de umidade solo, combinado com outros parâmetros meteorológicos, climatológicos, geomorfológicos e pedológicos em ambiente SIG, pode fornecer, dependendo do modelo desenvolvido, informações relevantes ao entendimento dos processos hídricos em zonas não saturadas do solo. Além disso, as informações de umidade de solo também podem ser utilizadas como fonte de dado de entrada de modelos que visam compreender a sustentabilidade dos sistemas hídricos, a recuperação de área degradada, a prevenção de seca e de superfície de inundação, o mapeamento de áreas suscetíveis ao escoamento, além de outros.

A cartografia geotécnica utiliza diversas ferramentas na análise do meio físico, como a investigação de campo e laboratório, associada ao uso de recursos tecnológicos, dentre eles os SIG (Souza, 1995). Na análise da umidade dos solos, as características passíveis de reconhecimento, quantificação ou qualificação, principalmente, aquelas associadas a grandes áreas, necessitam da utilização desses recursos tecnológicos.

Desse modo, a manipulação, o tratamento e o armazenamento de grandes quantidades de informação podem ser subsidiados por meio do mapeamento geotécnico, na análise da distribuição espacial e temporal de características que permitem inferências quanto à correspondente distribuição da umidade dos solos.

Na manipulação dos dados e geração de informações, são utilizadas funções específicas, aplicadas à finalidade da análise. Por exemplo, os compartimentos altimétricos, que correspondem a regiões homogêneas quanto à ocorrência de processos associados à dinâmica externa, podem ser delimitados na modelagem da distribuição da frequência dos valores de altitude, observando-se estatisticamente as quebras naturais do relevo.

Chagas *et al.* (2013), ao analisarem atributos topográficos na diferenciação de solos do tipo Argissolo, utilizaram modelos com base em SIG, levando em conta a latitude, as altitudes, as declividades, a orientação das vertentes, o sombreamento topográfico, as mudanças diárias e sazonais no ângulo solar e a atenuação atmosférica, para estimar a radiação solar em áreas de topografia complexa. Uma extensão específica, disponível para o SIG, utilizado por eles, foi aplicada para computar a radiação solar global para cada pixel do modelo de elevações da área estudada. A quantidade de radiação solar incidente sobre os perfis estudados, observada a variação de acordo com a orientação das vertentes, foi aventada como possível explicação da diferença existente na distribuição e nas propriedades dos solos das encostas selecionadas.

Assim, na modelagem de dados altimétricos ou de elevação, permitida por meio do uso das tecnologias de geoprocessamento, existentes nos SIG, diversas funções são utilizadas para permitir a análise da distribuição de características que estão correlacionadas, dentre outros fatores, à morfologia do terreno, como é o caso da modelagem realizada por meio do Índice Topográfico de Umidade (*TWI*) ou da distribuição da umidade, levando-se em conta a profundidade do nível freático.

Como já descrito, o índice *TWI* tem sido utilizado para a análise e comparação entre condições hidrológicas similares. Nesse sentido, Lin *et al.* (2006), ao estudarem solos em

uma bacia hidrográfica na Pensilvânia, utilizando um modelo digital de elevação para o cálculo de atributos do terreno, entre eles, o índice *TWI*, observaram, em comparação com medidas de umidade realizadas em campo, que esse índice auxiliou na análise da distribuição da umidade na área de estudos em questão. Esses autores destacaram que as condições de umidade também estão associadas à espessura, estrutura e à permeabilidade dos solos. Dessa forma, os valores elevados de *TWI* associaram-se a relevo plano e áreas de várzea, onde foram encontrados solos do tipo Organossolos e Gleissolos.

De acordo com a descrição da modelagem do índice *TWI* realizada por Batista (2014), ressalta-se, entretanto, que, no cálculo, como existe a divisão por valores de declividades, a divisão por zero gerará erros matemáticos no modelo. Por isso, é necessário investigar se na área em estudos ocorre o valor absoluto zero para evitar incongruências matemáticas e físicas relativas a possíveis áreas planas existentes.

Rennó e Soares (2003) também relataram outro fato importante na modelagem do índice *TWI*, ao tentarem correlacioná-lo com a profundidade do nível freático, na comparação com áreas conhecidas como naturalmente saturadas, como é o caso das nascentes, alcançando boas estimativas. Outro destaque deve ser dado quanto ao índice topográfico, calculado para regiões semiáridas, como foi o caso do estudo realizado por Gómez-Plaza *et al.* (2001), em uma região semiárida ao sul da Espanha, que demonstrou que para essas áreas, em que a umidade do solo é fortemente influenciada pela evapotranspiração e pela radiação solar, o índice topográfico deve levar em conta, principalmente, a insolação potencial.

Quanto à análise do teor de umidade, realizada por meio da modelagem do nível freático, destaca-se o atributo já mencionado anteriormente, denominado de distância vertical acima da drenagem mais próxima (*HAND*). Esse atributo normaliza a topografia de acordo com as alturas relativas locais, encontradas ao longo da rede de drenagem, e dessa forma, pode auxiliar na distinção entre regiões com propriedades hidrológicas semelhantes (Nobre *et al.*, 2011; Rennó *et al.*, 2008). Como exemplo de aplicação, Rennó *et al.* (2008) afirmaram que foram encontradas fortes correlações no cálculo do *HAND* com as condições de umidade em estudos realizados em terrenos da Amazônia.

Na modelagem do atributo *HAND*, inicialmente, a partir de um modelo digital de elevação com as respectivas topologias corrigidas, são calculadas as direções de fluxo, as quais definem as relações hidrológicas entre diferentes pontos de uma bacia. Com isso, são calculadas as áreas de fluxo acumulado e definidos limiares para a extração da drenagem. De posse desses três resultados, são aferidas as alturas resultantes das distâncias verticais relativas, que equivalem ao *HAND* (Batista, 2014; Rennó *et al.*, 2008).

Comparações da aplicação do *HAND* realizadas em modelos digitais de elevação (MDE) de diferentes resoluções, foram feitas por Rodrigues *et al.* (2011), em um estudo de caso localizado em Manaus (AM). Esses autores utilizaram MDE com resolução de 30 e de 90 metros, e observaram que modelos com maior resolução digital são mais aplicados a análises locais e que quando a finalidade é de reconhecimento de fenômenos regionais, como é o caso da delimitação de compartimentos do relevo, definindo-se unidades de paisagem, a resolução de 90 metros mostrou-se mais adequada, pois, no caso em específico da fonte de dados de relevo e das características fisionômicas do local, a altura de elementos como as copas das árvores interfere no resultado.

4. REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA REFERENTE AO TEOR DE UMIDADE DOS SOLOS

Como já descrito neste capítulo, os processos de escoamento superficial e de infiltração influenciam as condições de umidade do material subjacente. Dentre a documentação cartográfica que representa informações relacionadas ao teor de umidade dos solos, é possível destacar a elaboração de cartas geotécnicas associadas aos processos da dinâmica externa, como a Carta de Escoamento Superficial e de Infiltração – denominadas por Zuquette e Gandolfi (2004), de cartas derivadas, por serem documentos elaborados a partir de cartas básicas.

Atributos que podem ser levantados e representados em cartas básicas, para a análise dos processos de escoamento superficial e de infiltração são enumerados por Zuquette e Gandolfi (2004), tais como:

- a) áreas com acúmulo de água (temporário ou permanente), associadas ou não a hidromorfismo, bacia de contribuição, densidade de drenagem, áreas de recarga, declividades, forma (curvaturas) e comprimento das encostas;
- b) litologia, mineralogia, profundidade do substrato rochoso, existência de descon continuidades no maciço; origem (residual ou retrabalhado), espessura, tipo, textura; estrutura, associados à condutividade hidráulica do material inconsolidado;
- c) vegetação natural e antrópica;
- d) pluviosidade, insolação, intensidade e distribuição temporal das chuvas, além de
- e) processos superficiais gerados a partir da interferência antrópica, como cordões de nível, bacias de contenção, canais construídos para drenagem e áreas com irrigação.

Destaque é dado, por esses autores, à representação dos atributos tais como infiltração e escoamento, que devem ser de natureza ordenada, pois, em geral, são mapeados de modo a possuir uma hierarquia entre as classes da legenda, de tal forma que essa torne a carta autoexplicativa. Por exemplo, as classes podem apresentar uma ordem no que se refere à variação da cor (Oliveira e Romão, 2013), alterando o seu brilho ou a sua saturação, variando-se, na mesma cor, desde tonalidades mais escuras, até mais claras ou mesmo das mais saturadas até às menos saturadas. Além da cor, os matizes podem, também, ser ordenados segundo os seus comprimentos de onda, sendo indicada apenas uma sequência do espectro (Oliveira e Romão, 2013), ou seja, a utilização apenas das cores denominadas quentes, ou apenas das cores denominadas frias.

Como discutido anteriormente, atributos relacionados ao teor de umidade podem ser identificados, avaliados e representados por meio de documentação cartográfica. Assim, são apresentados exemplos de documentação cartográfica que podem servir de subsídio a essas análises de condições de umidade dos solos. Tais documentações apresentadas são resultantes de pesquisas realizadas em Geotecnia, na UnB, e foram realizadas por Batista (2014), Luiz (2012), Silva (2007) e Silva (2011), os quais elaboraram mapas e cartas, como:

- a) mapas temáticos de Armazenamento (S) e de Escoamento Superficial (Q) (Figura 2); do Índice *TWI*, de Distância de Drenagem pelo Fluxo Acumulado, de Distância Vertical à Drenagem Mais Próxima (*HAND*) (Figura 3) e de Profundidade dos Solos (Figura 4);

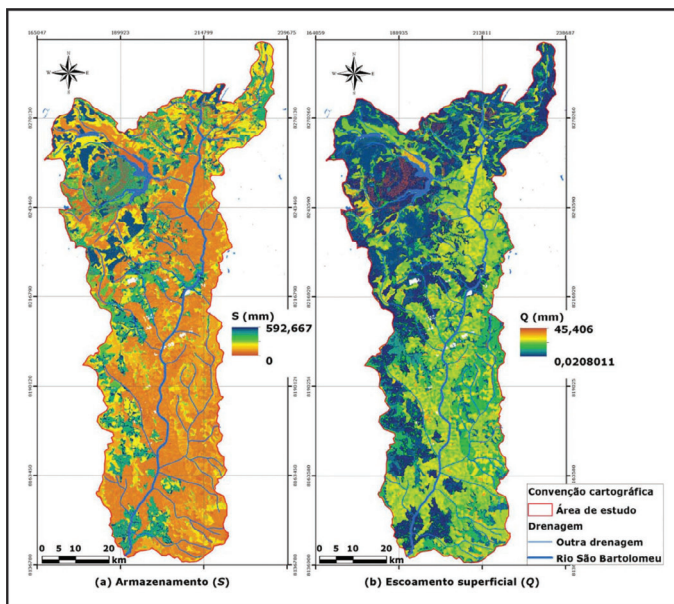


Figura 2 – Mapas de Armazenamento e Escoamento superficial (Batista, 2014)

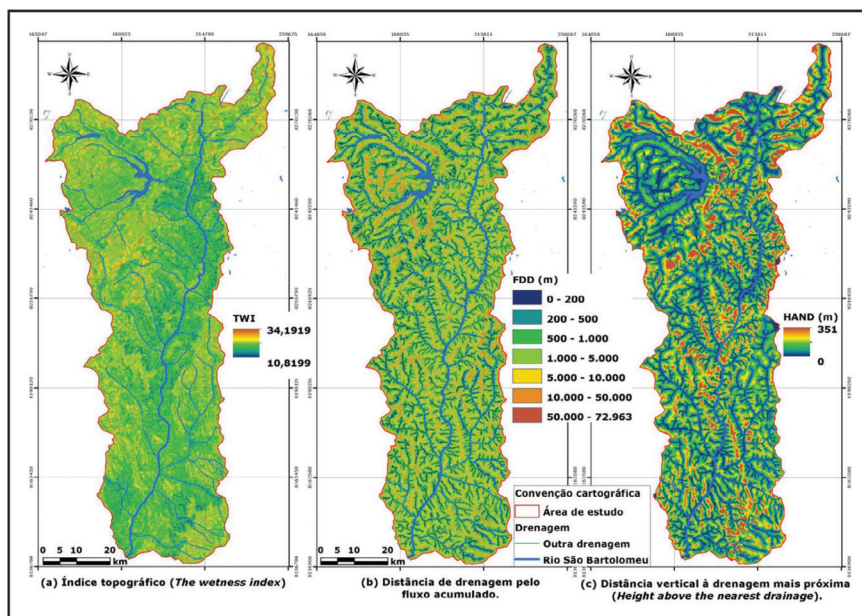


Figura 3 – Mapas do índice topográfico (*TWI*), de distância de drenagem pelo fluxo acumulado e de distância vertical à drenagem mais próxima (*HAND*) (Batista, 2014)

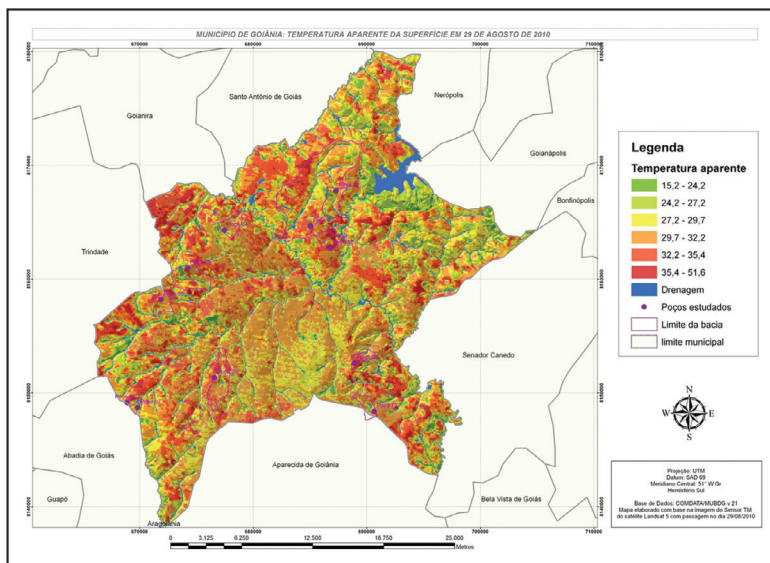


Figura 6 – Mapa de Temperatura aparente da superfície (°C) no Município de Goiânia-GO em 29/08/2010 (Luiz, 2012)

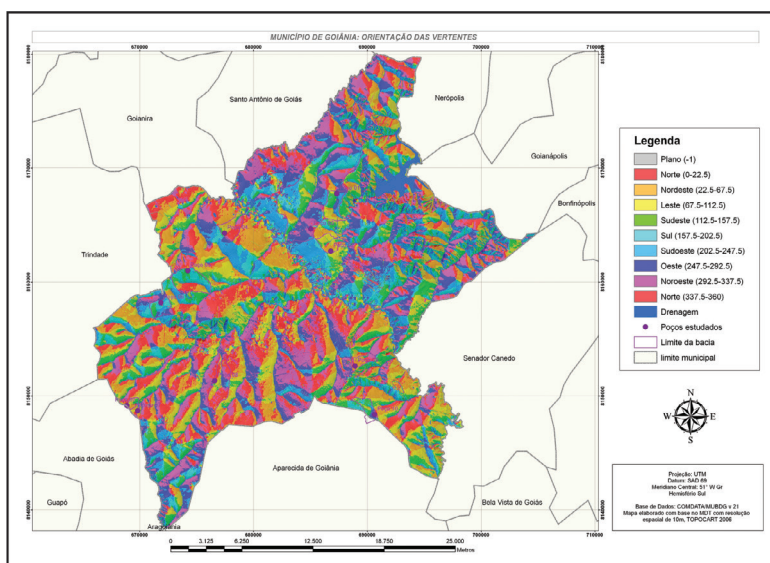


Figura 7 – Carta de Orientação das Vertentes do Município de Goiânia-GO (Luiz, 2012)

c) carta da cota do nível d'água do nível d'água (Figura 8); e outras documentações, como um modelo tridimensional, representando as distintas camadas de materiais inconsolidados, descritos conforme as sondagens à percussão realizadas (Figura 9).

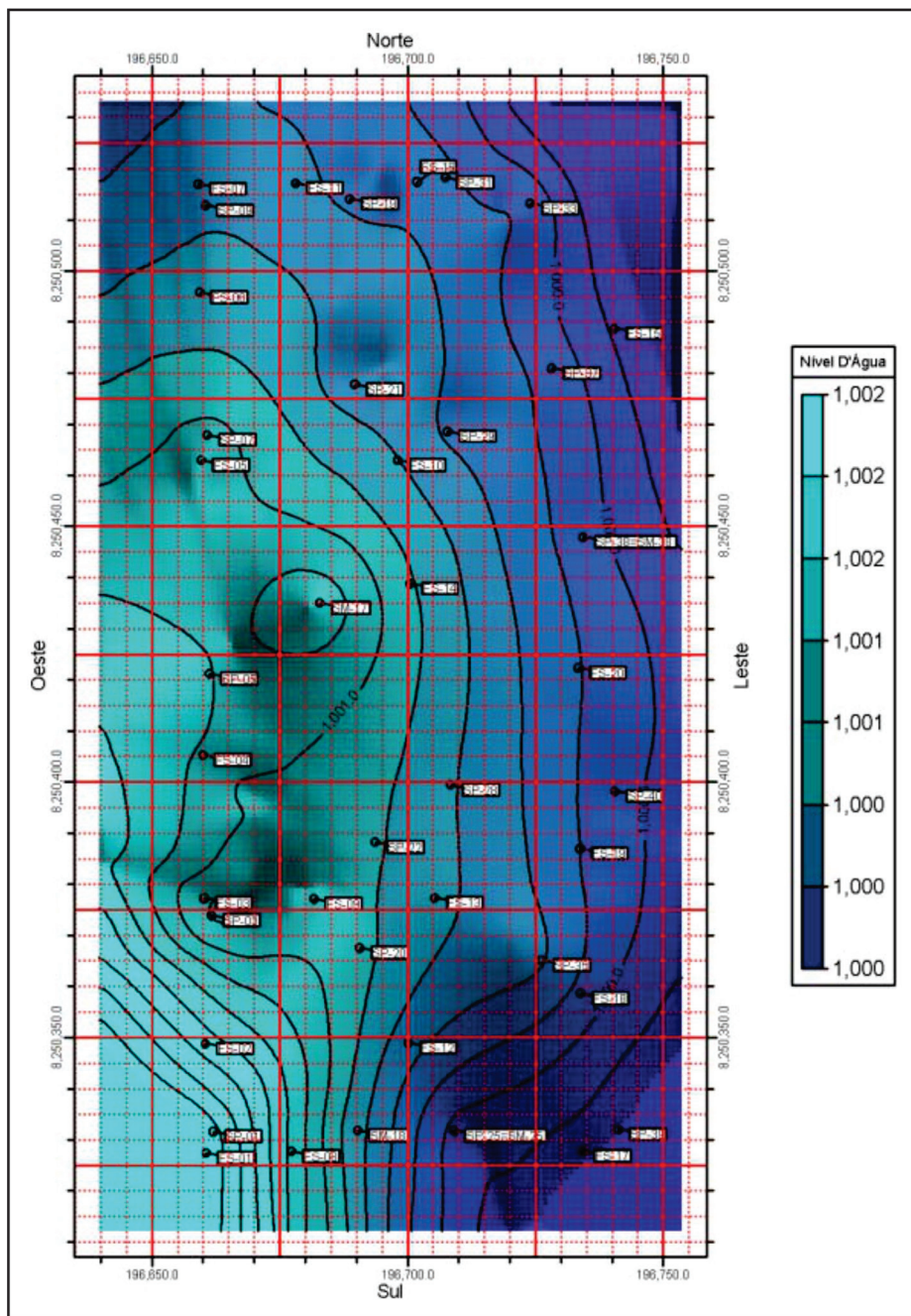


Figura 8 – Carta da cota do nível d'água do estudo de caso
Brisas do Lago-DF (Silva, 2011)

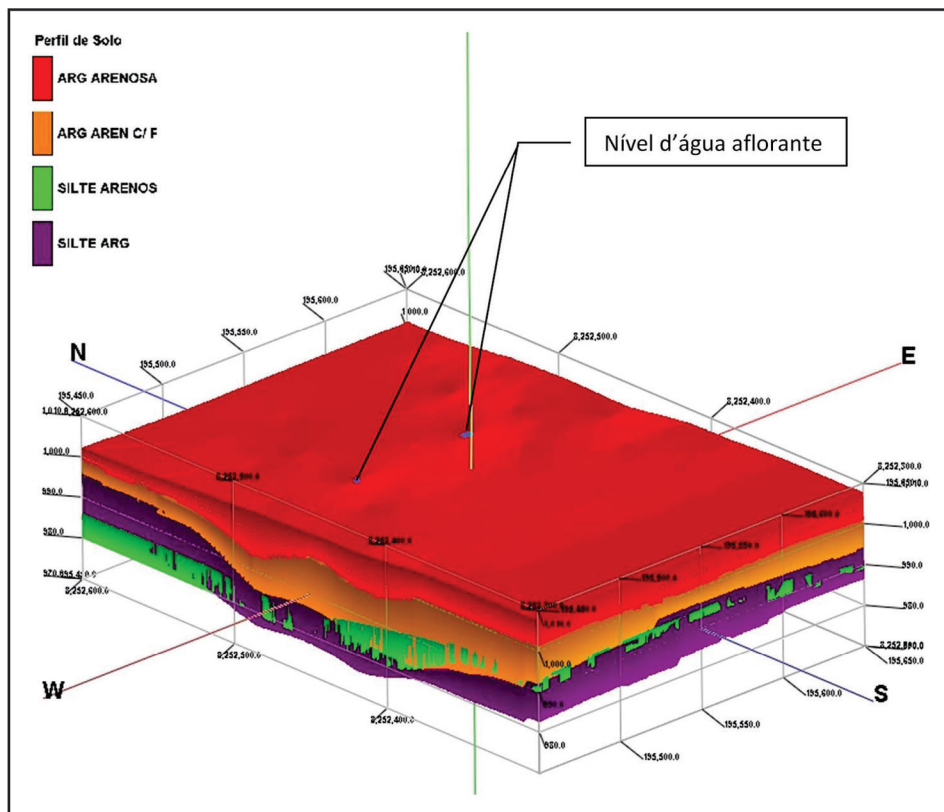


Figura 9 – Modelo tridimensional das camadas de materiais inconsolidados, segundo descrição de sondagens à percussão, estudo de caso Projeto Ilhas do Lago-DF (Silva, 2007)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento espaço temporal das condições, superficiais e subsuperficiais, de umidade dos solos tem sido viabilizado por meio da cartografia geotécnica. Desse modo, análises do comportamento geotécnico dos solos não saturados são possíveis por meio de documentação cartográfica, a qual represente atributos relacionados aos processos da dinâmica externa, predominantes nas regiões intertropicais brasileiras, os quais se associam à variação espacial e temporal dessa umidade.

Tendo em vista esse contexto, neste capítulo foi destacada a utilização das principais tecnologias que têm permitido o mapeamento dos solos em grandes áreas, desde o mapeamento indireto por sensoriamento remoto, até a modelagem de informações relevantes ao entendimento dos processos hídricos, utilizando-se SIG, possibilitando, assim, a realização de inferências quanto à correspondente distribuição de umidade em superfície e em subsuperfície.

Dentre os atributos que interferem nessas condições, os principais fatores de formação dos solos foram inicialmente abordados. Discutiram-se, então, as características climáticas, geológicas, pedológicas e geomorfológicas consideradas importantes na estimativa de propriedades, as quais podem ser qualificadas e/ou quantificadas, no mapeamento da variação espacial e temporal do teor de umidade dos solos.

Considerando-se o impacto das variações de umidade no comportamento dos solos não saturados, geralmente significativo, interferindo, por exemplo, no potencial de retenção de água do solo, nos resultados de ensaios como o SPT, no desempenho de fundações e na estabilidade de encostas, amplia-se a importância da cartografia geotécnica nas atividades de planejamento do uso e ocupação dos solos, seja em meio rural ou urbano.

REFERÊNCIAS

- BAGHDADI, N.; AUBERT, M. & ZRIBI, M. (2012). Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 9 (3): 512-516.
- BAGHDADI, N.; AUBERT, M.; CERDAN, O.; FRANCHISTÉGUY, L.; VIEL, C.; MARTIN, E.; ZRIBI, M.; & DESPRATS, J.F. (2007). Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: application to the touch basin (France). *Sensors*, 7(10): 2458-2483.
- BATISTA, P.H.L. (2014). Cartografia Geotécnica aplicada aos riscos de alagamento e Inundação na Bacia do rio São Bartolomeu. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 223 pp.
- BÖHNER, J. & ANTONIC, O. (2009). Land-surface parameters specific to topo-climatology. HENGL T. & REUTER H. I. (eds). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Vol. 33. Amsterdam, Elsevier. pp. 195-226.
- BORGHETTI, A.; LACERDA, W.A. & LOPES, F.R. (2007). Modelagem física da água da chuva em talude arenoso. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Salvador, BA, pp. 443-450.
- CASTRO, S.S.; COOPER, M.; SANTOS, M.C. & VIDAL-TORRADO, P. (2003). Micromorfologia do solo: bases e aplicações. *Tópicos em Ciências do solo*, 3:107-164.
- CHAGAS, C.S.; FONTANA, A.; CARVALHO JÚNIOR, W. & CAIRES, S.M. (2013). Atributos topográficos na diferenciação de argissolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37:1441-1453.
- CHUKHLANTSEV, A.A.; SHUTKO, A.M. & GOLOVACHEV, S.P. (2003). Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 48(11): 1177-1202.

DOBOS, E & HENGL, T. (2009). Soil Mapping Application. HENGL, T. & REUTER, H.I. (eds). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. Vol. 33. Amsterdam, Elsevier. pp. 461-479.

DUBOIS, P.; VAN ZYL, J.J. & ENGMAN, T. (1995). Measuring of soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33 (4): 916-926.

EVANS, I.S. (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. CHORLEY, R.J. (ed). *Spatial Analysis in Geomorphology*. Harper & Row, Publishers, New York, pp. 17-90.

GÓMEZ-PLAZA, A.; MARTÍNEZ-MENA, M.; ALBALADEJO, J. & CASTILLO, V.M. (2001). Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 253: 211-226.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE (2010). Distância vertical à drenagem mais próxima. Divisão de Processamento de Imagens (DPI/INPE). Grupo de Modelagem para Estudos da Biodiversidade. Variáveis Ambientais para a Modelagem de Distribuição de Espécies (AmbData). Disponível em: <<http://www.dpi.br/Ambdata/hand.php>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

JACKSON, T. J.; LE VINE, D. M. & HSU, A. Y. (1999). Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: the Southern great plains hydrology experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2136-2151.

JACKSON, T. J.; COSH, M. H. & BINDLISH, R. (2010). Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (12): 4256-4272.

JENNY, H. (1941). *Factors of Soil Formation*. MacGraw-Hill, New York, 288p.

JENSEN, J.R. (2009). Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres. Trad. EPIPHANIO, J.C.N. (Coord.). [*et al.*]. Parênteses, São José dos Campos, 598 pp.

KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. (2002). Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26:857-867.

LIN, H.S.; KOGELMANN, W.; WALKER, C. & BRUNS, M.A. (2006). Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydropedological perspective. *Geoderma*, 131:345-368.

- LUIZ, G.C. (2012). Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – Município de Goiânia-GO. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 246 pp.
- MCKENZIE, N.J. & RYAN, P.J. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89: 67-94.
- MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B. & LADSON, A.R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Process*, 5: 3-30.
- NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.; RENNO, C.D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M. & SALESKA, S. (2011). Height above the nearest drainage: a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404: 13-29.
- OLIVEIRA, I.J. & ROMÃO, P.A. (2013). Linguagem dos mapas: cartografia ao alcance de todos. Ed. da UFG, Goiânia, 126 pp.
- QUINN, P.F.; BEVEN, K.J. & LAMB, R. (1995). The $\ln(a/\tan B)$ Index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrological Processes*, 9:161-182.
- RENNO, C.D. & SOARES, J.V. (2003). Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Belo Horizonte, pp. 2579-2588.
- RENNO C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; JAVIER TOMASELLA, J. & WATERLOO, M.J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112:3469-3481.
- RODRIGUES, G.O.; NOBRE, A.D.; SILVEIRA, A.C. & CUARTAS, L.A. (2011). Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) – estudo de caso em Manaus/AM. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Curitiba, pp. 5769-5776.
- ROMÃO, P.A. (2006). Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas – região de Goiânia - GO. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 166 pp.
- ROSSATO, L. (2009). Estimativa da umidade superficial do solo a partir de sensoriamento remoto por microondas passiva sobre a América do Sul. Tese de Doutorado, INPE, 147 pp.
- SÁNCHEZ, N.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; CALERA, A.; TORRES, E. & PÉREZ-GUTIÉRREZ, C. (2010). Combining remote sensing and *in situ* soil moisture data

for the application and validation of a distributed water balance model (HIDROMORE). *Agricultural Water Management*, (98): 69-78.

SCHMUGGE, T.J. & JACKSON, T.J. (1994). Mapping soil moisture with microwave radiometers. *Meteorology and Atmospheric Physics*, (54): 213-223.

SCHMUGGE, T.J.; KUSTAS, W.P.; RITCHIE, J.C.; JACKSON, T.J. & RANGO, A.L. (2002). Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25:1367-1385.

SILVA, C.P.L. (2007). Cartografia geotécnica de grande escala: estudo de caso Brasília - área tombada pela Unesco. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 106 pp.

SILVA, C.P.L. (2011). Cartografia geotécnica tridimensional do setor Noroeste de Brasília. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 265 pp.

SIRTOLI, A.E.; SILVEIRA, C.T.; MANTOVANI, L.E.; SIRTOLI, A.R. & OKA-FIORI, C. (2008). Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. *Scientia Agraria*, 9(3):317-329.

SOUZA, N.M. (1995). A cartografia geotécnica como instrumental da geografia física para estudos urbanos. VI Simpósio Nacional de Geografia Física Aplicada, UFG, Goiânia, v.1, pp. 19-20.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M. & PEREIRA, G.T. (2006). Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(3):487-492.

TOMA, R.S.; COOPER, M.; TAVARES, M.F.; CARVALHO, C.C. & TEATO, A.C. (2013). Evolução temporal do comportamento físico-hídrico do solo de um sistema agroflorestal no Vale do Ribeira - SP. *Scientia Forestalis*, 41(98):237-248.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, 16 (3): 574-582.

TRENTIN, R. & ROBAINA, L.E.S. (2005). Metodologia para mapeamento geoambiental no oeste do Rio Grande do Sul. XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. USP. São Paulo, pp. : 3606-3615. (CD-ROM).

ULABY, F.T.; DUBOIS, P.C. & VAN, Z.Y.L.J. (1996). Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of Hydrology*, 184 (1-2):57-84.

VALERIANO, M.M. (2002). Mapeamento do comprimento de rampa em microbacias com Sistema de Informação Geográfica. *Acta Scientiarum*, 24(5):1541-1551.

VEREECKEN, H.; HUISMAN, J.A.; PACHEPSKY, Y. & MONTZKA, C., VAN DER KRUK, J.; BOGENA, H.; WEIHERMÜLLER, L.; HERBST, M.; MARTINEZ, G. & VANDERBORGHT, J. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516: 76-96.

VIVONI, E.R.; GEBREMICHAEL, M.; WATTS, C.J.; BINDLISH, R. & JACKSON, T.J. (2008). Comparison of ground-based and remotely sensed surface soil moisture estimates over complex terrain during SMEX04. *Remote Sensing of Environment*, 112: 314-325.

WANG, L. & QU, J.J. (2009). Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 3(2): 237-247.

YICHANG, W.; FANG, Z.; LIPING, Z.; LINGLING, K. & XIAOQIANG, L. (2010). Estimating soil moisture in semi-arid region by remote sensing based on TM data. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1: 1-5.

ZENG, Y.; FENG, Z. & XIANGA, N. (2004) Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, (6): 4036-4039.

ZHAN, Z.; QIN, Q. & WANG, X. (2004). The Application of LST/NDVI Index for Monitoring Land Surface Moisture in Semiarid Area. *Geoscience and Remote Sensing IGARSS '04. Proceedings 2004, IEEE International*, 3:1551-1555.

ZRIBI, M.; BAGHDADI, N.; HOLAH, N. & FAFIN, O. (2005). New methodology for soil surface moisture estimation and its application to ENVISAT-ASAR multi-incidence data inversion. *Remote Sensing of Environment*, 96:485-496.

ZUQUETTE, L.V. & GANDOLFI, N. (2004). *Cartografia geotécnica. Oficina de Textos*, São Paulo, 190 pp.