

## **ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES NO ESTUDO DE DESLIZAMENTOS DE TERRA**

*Soil Moisture Estimation using Remote Sensing and its Possible  
Applications in the Study of Landslides*

**Cristina de Queiroz Telles Maffra<sup>1</sup> & Jorge Antonio da Silva Centeno<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Ministério Público Federal – MPF**

**Secretaria de Apoio Pericial**

SAF Sul Quadra 4 Conjunto C, Bloco B, CEP 70050-900, Brasília/DFM, Brasil

cristinam@mpf.mp.br

**<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná – UFPR**

**Setor de Ciências da Terra -Departamento de Geomática**

Caixa Postal 19.001, CEP 81531-970, Curitiba/PR, Brasil

centeno@ufpr.br

*Recebido em 11 de Outubro, 2015/ Aceito em 22 de Julho, 2016*

*Received on October 11, 2015/ Accepted on July 22, 2016*

### **RESUMO**

Desastres naturais ocorrem em diversas partes do globo todos os anos e os movimentos de massa, ou seja, escorregamentos ou deslizamentos de terra, corridas de lama, queda de blocos são responsáveis por inúmeras perdas humanas e materiais. Dentre os principais fatores condicionantes desses fenômenos está a umidade do solo que, tanto em excesso quanto em escassez, pode condicionar a ocorrência do fenômeno. No litoral do Estado de São Paulo durante o período de chuvas são frequentes os deslizamentos de terra, por esse motivo desde 1989 existe o Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) que visa evitar acidentes por meio da implantação de um conjunto de medidas preventivas. O PPDC utiliza índices pluviométricos para deflagrar seu sistema de alerta. Para o litoral do Estado de São Paulo adotam como limiares críticos valores de acumulado de chuvas de 72 horas superiores a 100mm e 120mm. Seguindo esse raciocínio, o presente trabalho procurou estudar as variações espaciais da umidade do solo em terrenos suscetíveis a escorregamentos, por meio da análise multitemporal de imagens multiespectrais correlacionadas a dados pluviométricos. O local escolhido foi a região sul da Itália, cuja combinação de relevo e litologia, além da abundância de informações, facilitaram a realização do estudo. Dados espectrais adquiridos entre 2000 e 2002, pelos sensores Landsat ETM, ASTER e MODIS e obtidos em diferentes tipos de solos foram correlacionados, por meio da análise multivariada a dados pluviométricos. O objetivo foi o de gerar um modelo capaz de contribuir na predição da umidade do solo por meio da combinação de bandas e índices espectrais e dessa forma auxiliar o mapeamento de áreas com risco a deslizamentos de terra. Para cada sensor, os dados espectrais foram aprimorados com a utilização de índices como NDVI, NDII, Transformação *Tasseled Cap* e Análise dos Componentes Principais das bandas do infravermelho. Também foram utilizadas imagens da Temperatura Superficial (ASTER) e Temperatura Superficial Noturna (MODIS). Na obtenção do modelo foram utilizadas a Análise Discriminante, a Análise de Correlação Múltipla e o Método de Grupo para Manipulação de Dados (GMDH). Os resultados revelaram serem os sensores ASTER e MODIS eficientes na determinação da umidade do solo por meio da utilização de bandas no infravermelho médio combinadas à Temperatura Superficial e ser o MODIS o sensor mais indicado no estudo regional da umidade do solo. Com o advento de novos sensores no final dos anos

2000 uma gama maior de possibilidades se abre para a modelagem da umidade do solo especialmente voltada para análise de risco de deslizamentos de terra.

**Palavras chaves:** Umidade do Solo, Sensoriamento Remoto, ASTER, MODIS, Modelagem, Deslizamentos de Terra.

## ABSTRACT

Natural disasters affect different parts of the globe every year and mass movements, including landslides, mud flow and rock falling are responsible for numerous human and material losses. Soil moisture is one of the triggering factors of these phenomena, and in excess or in shortage may affect its occurrence. In the São Paulo coastal area during the rains season there are frequent landslides, therefore since 1989 there is the Preventive Plan of Civil Defense (PPDC) designed to prevent accidents through the implementation of a set of preventive measures. The PPDC uses rainfall data to trigger its alarm system. For the São Paulo coastal area it is adopted as critical thresholds values upper 100mm and 120mm accumulated during 72 hours of rain. Following this reasoning, the present paper sought to study the spatial variations of soil moisture in vulnerable areas, using multi-temporal analysis of multispectral images correlated with rainfall data. The venue was the southern region of Italy, whose combination of relief and lithology, in addition to plenty of information facilitated the study. Spectral data acquired between 2000 and 2002 by the sensors Landsat ETM, ASTER and MODIS and obtained in different types of soils were correlated by multivariate analysis with rainfall data. The goal was to generate a model that contribute to soil moisture prediction by combining bands and spectral indexes and thus aid the mapping of landslides risk areas. For each sensor, the spectral data were enhanced with the use of indexes such as NDVI, NDII, *Tasseled Cap* Transformation and Principal Component Analysis of infrared bands. It was also used Surface Temperature (ASTER) and Nocturnal Superficial Temperature (MODIS) images. In order to obtain the model Discriminate Analysis, Multiple Correlation Analysis and Group Method for Data Handling (GMDH) were used. The results indicated that ASTER and MODIS sensors are efficient in determining soil moisture by using bands in the mid-infrared combined with Surface Temperature and to be the MODIS sensor the most suitable for regional studies of mass movements that have on soil moisture one of its main determining factors. With the advent of new sensors in the late of 2000s a wider range of possibilities opens to the modeling of soil moisture, especially geared for analyzing risk of landslides.

**Keywords:** Soil Moisture, Remote Sensing, ASTER, MODIS, Modeling, Landslides.

## 1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da umidade do solo tem relevância em diversas aplicações, como no estudo da agricultura, para o gerenciamento da irrigação; no estudo de processos hidrológicos, para previsão de enchentes; e no estudo de certos desastres geológicos como movimentos de massa, onde a umidade do solo pode ser considerada como um dos fatores desencadeadores de tais eventos.

As técnicas tradicionais de medidas da umidade do solo (gravimétricas, tensiométricas, higrométricas) são pontuais e não levam em consideração a variabilidade espacial e temporal típica deste parâmetro. Além disso, são custosas e difíceis de serem aplicadas em um estudo regional. Para contornar essas dificuldades o Sensoriamento Remoto aparece como uma alternativa, porém, pelo fato de se obter medidas indiretas da umidade do solo, erros causados pela variação do tipo de solo, variação da rugosidade da superfície, cobertura vegetal e inadequada

cobertura espacial e temporal existem e podem comprometer a acurácia dos resultados.

O objetivo deste estudo foi o de determinar, por meio de sensoriamento remoto, a umidade do solo como forma de auxiliar a determinação de áreas mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de terra.

## 2. USO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

Embora o Sensoriamento Remoto ofereça grandes vantagens para a estimativa de umidade do solo, o sensor ideal para esta finalidade ainda não existe. Ele teria que apresentar alta resolução temporal (recobrimento diário); espacial (inferior a 5m) e espectral (apresentando comprimentos de onda que vão do infravermelho às microondas), pois as características da umidade mudam em períodos curtos e localmente, além disso, as imagens deveriam poder ser obtidas a baixo custo, o que limita o número de opções.

O final dos anos 2000 trouxe uma gama de novas possibilidades de utilização de sensoriamento remoto, especialmente com o advento de sensores como Rapid Eye, que podem reduzir a incerteza na correlação com dados de campo e suprimir a necessidade de informações em escala de maior detalhe, porém, em termos práticos, seu uso ainda é restrito em função do seu custo.

Em termos de resolução espectral, os sensores com boa resolução no infravermelho próximo e médio (incluindo as bandas termais) são os mais indicados para a determinação da umidade do solo. Na lista de sensores multiespectrais economicamente acessíveis cita-se Landsat ETM, ASTER e MODIS. Em relação à alta resolução temporal, sensores com recobrimento diário, como MODIS, NOAA e SPOT Vegetation, são ideais. Diante do anteriormente exposto priorizou-se o uso dos sensores Landsat ETM, ASTER e MODIS.

Em relação aos parâmetros físicos a serem estudados, há que se considerar que quando há aumento de quantidade da água no solo há diminuição da refletância do solo. Essa diferença é mais sentida em comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio, onde a absorção da água é maior, por este motivo os sensores remotos que atuam no infravermelho próximo e médio trazem informação útil para a umidade do solo. Autores como Houser (1996), Koster *et al.* (1999), Muller e Decamp (2000) e Sandholt, Rasmussen e Andersen (2002), Vivoni *et al.* (2008), Yichang *et al.* (2010) e Lopes *et al.* (2013) utilizaram sensoriamento remoto no estudo de parâmetros hidrológicos e, mais especificamente, no estudo da umidade do solo. Além disso, é extenso o número de estudos que buscam a identificação, não da umidade, mas da falta dela, ou seja, a identificação de seca ou facilidade ao fogo (KENNEDY *et al.*, 1994; FLASSE & CECCATO, 1996; GOBRON *et al.*, 1999; GOBRON *et al.*, 2000; JUSTICE *et al.*, 2002; ROY *et al.*, 2002). A metodologia aplicada nesses estudos é similar àquela aplicada no estudo da umidade do solo. Além do infravermelho a faixa das microondas também tem sido utilizada na detecção da umidade do solo devido à sua alta capacidade de penetração e a possibilidade de detecção, através deste comprimento de onda, da constante dielétrica do solo e da água.

Já a correlação entre medidas espectrais e a ocorrência de movimentos de massa também tem sido objeto de estudo. Walsh e Butler (1997), estudaram essa correlação por meio de análise de regressão multivariada; Mckean *et al.* (1991), criaram um mapa de probabilidade de ocorrência de corridas de lama a partir de um modelo de regressão baseado em índices de chuva, tipos de solo, declividade e média anual de chuva. Nichol e Wong (2005) utilizaram dados de detecção de mudança e fusão de imagens para criar um inventário sobre deslizamento de terra e Van Westen, Castellanos e Kuriakose (2008) apresentaram uma interessante revisão sobre o uso de dados espaciais para o estudo de deslizamentos de terra, entre eles destaca-se o uso de modelos digitais do terreno obtidos a partir de satélites de alta resolução como o Quickbird, IKONOS, PRISM e CARTOSAT-1.

### **3. ÁREA DE ESTUDO E MATERIAIS**

A área escolhida para este estudo foi o sul da Itália, região de Campanha, mais especificamente os municípios de Nápoles e Salerno (Figura 1). Essa área é alvo frequente de movimentos de massa e apresenta bastante heterogeneidade do ponto de vista geomorfológico e litológico. Apresenta cobertura vegetal pouco densa, com extensas áreas de solo exposto ou semiexposto em meias vertentes. Todas essas características tornaram possível isolar algumas variáveis como, por exemplo, vegetação, tipo de solo e morfologia do terreno. Além disso, encontra-se nessa área um número suficiente de estações pluviométricas, o que contribui para se elaborar um modelo de estimativa de umidade a partir de dados pluviométricos.

Neste estudo foram utilizados dados espectrais de imagens adquiridas entre 2000 e 2002: uma imagem Landsat ETM, de 28 de novembro de 2002; duas imagens MODIS de refletância de superfície, bandas 1 a 7, e também a temperatura superficial noturna (TSN) adquiridas em 06 de abril de 2002 e 23 de abril de 2002; seis imagens ASTER de refletância de superfície (AST07) e temperatura superficial (AST05), adquiridas em 26 de setembro de 2000, 25 de junho de 2001, 20 de julho de 2001, 28 de janeiro de 2002, 20 de maio de 2002 e 17 de agosto de 2002, além de dois modelos digitais do terreno relativos (AST14), gerados a partir

das imagens ASTER adquiridas em 25 de junho de 2001 e 28 de janeiro de 2002.

Foram utilizados também dados de 20 estações pluviométricas durante o mesmo período de aquisição das imagens.

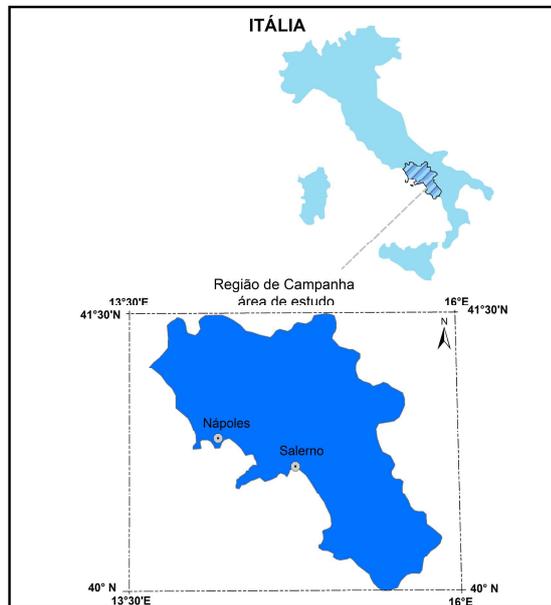


Fig. 1 – Localização da Área de Estudo, Região de Campanha, sul da Itália.

#### 4. MÉTODO

A estimativa da umidade do solo por meio de Sensoriamento Remoto se baseia em métodos de análise indireta. Para que os dados espectrais reflitam o parâmetro físico, no caso umidade, procurou-se isolar alguns fatores que poderiam interferir na resposta espectral. Além disso, as imagens de satélite sofrem outros tipos de interferências que devem ser eliminadas como os efeitos causados pela atmosfera e os efeitos da iluminação causados pelo relevo.

Neste estudo todas as imagens foram convertidas para valores de reflectância e os índices utilizados em algumas delas foram gerados a partir desses valores. Em linhas gerais, o método aplicado foi dividido em quatro fases distintas:

1. Primeira Fase - processamento das imagens;
2. Segunda Fase - obtenção de dados de verdade de campo;
3. Terceira Fase - modelagem do valor acumulado de chuvas a partir dos dados espectrais;
4. Quarta Fase – verificação.

#### 4.1 Processamento das Imagens

Como pré-processamento às imagens ASTER e MODIS foi realizado o seu georreferenciamento. A imagem Landsat ETM passou por georreferenciamento, correção atmosférica e correção dos efeitos da iluminação solar e conversão dos números digitais (NDs) para reflectância.

Com a finalidade de se aproveitar a informação contida nos índices espectrais, as bandas dos sistemas Landsat ETM, MODIS e ASTER foram combinadas sob forma de índices ou transformações espectrais conhecidas. No caso das imagens Landsat ETM optou-se por avaliar o comportamento dos índices de vegetação NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) e NDII (Normalised Difference Infrared Index), descritos nas equações 1 e 2; dos componentes principais das bandas do infravermelho (ETM5 e ETM7) e da banda umidade da Transformação Tasseled Cap, como indicaram estudos preliminares (MAFFRA & CENTENO, 2002). Para as imagens ASTER foram utilizadas as adaptações dos índices de vegetação NDVI e NDII e do *Tasseled Cap* – banda umidade.

No caso das imagens ASTER os índices NDVI e NDII foram calculados utilizando-se as bandas do visível e infravermelho próximo (VNIR): VNIR2 (0.63 - 0.69 $\mu$ m) e VNIR3 (0.78 - 0.86 $\mu$ m), em substituição as ETM3 (0.63 - 0.69 $\mu$ m) e ETM4 (0.76 - 0.90 $\mu$ m) normalmente utilizadas quando este índice é aplicado a imagens Landsat. No caso do cálculo do índice NDII foram utilizadas a primeira banda do infravermelho médio SWIR1 (1.6 - 1.7 $\mu$ m), no lugar da banda 5 do Landsat (1.55 - 1.75 $\mu$ m) e a banda VNIR3 no lugar da banda 4 do Landsat.

$$\text{NDVI} = (\text{VNIR3} - \text{VNIR2}) / (\text{VNIR3} + \text{VNIR2}) \quad (1)$$

$$\text{NDII} = (\text{VNIR3} - \text{SWIR1}) / (\text{VNIR3} + \text{SWIR1}) \quad (2)$$

Como no ASTER as bandas VNIR apresentam resolução espacial de 15m optou-se em efetuar a reamostragem das mesmas para a resolução de 30m. Além dos índices anteriormente mencionados, para as imagens ASTER e MODIS foram utilizadas também as imagens correspondentes a reflectância superficial de cada banda e da temperatura superficial.

## 4.2 Obtenção dos Dados de Verdade de Campo

Para a obtenção de dados de verdade de campo foi feita a seleção de dados de acumulado de chuvas e de pontos correspondentes no relevo para leitura espectral.

### 4.2.1 Seleção do Acumulado de Chuvas

Para descrever a umidade do solo utilizou-se um índice correspondente ao acumulado de chuvas. Este índice foi obtido por meio dos dados de vinte estações pluviométricas. Ele foi derivado tendo como referência o índice de acumulado de chuva, utilizado pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo e pela Defesa Civil do Estado de São Paulo como limiar crítico para deflagrar seu sistema de alerta a escorregamentos na região litorânea. O índice utilizado em São Paulo corresponde a valores de acumulado de chuvas de 72 horas superiores a 100mm e 120mm e foi baseado em estudos históricos de chuvas e escorregamentos.

Como a área em estudo apresenta características climáticas, geomorfológicas e geológicas muito distintas da região litorânea do Estado de São Paulo seria um erro utilizar o mesmo valor de acumulado de chuva para uma região ao sul da Itália. Desta forma, procurou-se estudar a variação dos dados pluviométricos por meio do acúmulo de chuva (mm) em 2, 4, 6 e 8 dias em relação à data de aquisição das imagens. Calculou-se o acúmulo de chuva dos dias anteriores à aquisição da imagem mais metade do acúmulo de chuva do dia de aquisição da imagem.

### 4.2.2 Critérios para escolha dos Pontos e Forma de Medição dos Dados

Após obter os dados de acumulados de chuvas para cada imagem e em cada estação pluviométrica, selecionou-se pontos de medida dos dados espectrais em cada tipo de solo para cada estação pluviométrica. Na escolha dos pontos, procurou-se escolher aqueles que representassem a confluência de vertentes, onde o acúmulo de água é maior. Para a identificação dos pontos na imagem, um modelo digital do terreno (MDT), derivado de um par estereoscópico de imagens ASTER foi utilizado. O MDT, com 30m de resolução espacial, foi utilizado para se criar uma imagem em 3D onde o ponto para a leitura dos índices e das bandas pudesse ser

escolhido com exatidão em função do relevo (Figura 2). Para cada pixel identificado foram lidos, além do valor do pixel, os valores de seus 8 vizinhos e calculou-se a média das leituras. Foram escolhidos ao menos três pontos por cada tipo de solo por cada estação meteorológica.

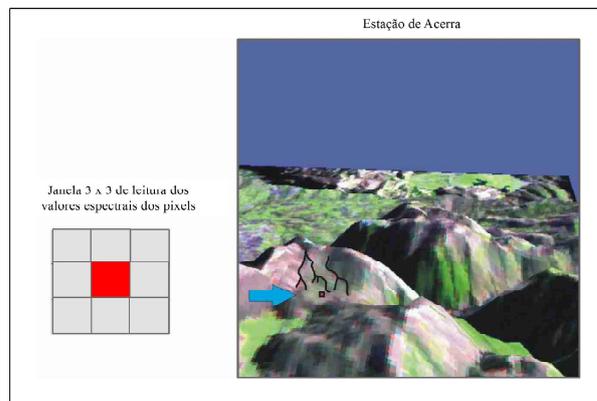


Fig. 2 - O ponto em vermelho indica o ponto para a leitura e foi escolhido com exatidão em função do relevo, nas proximidades da estação meteorológica. Foi criada uma imagem em 3D, a partir do Modelo digital do Terreno- MDT.

### 4.2.3 Critérios para escolha dos Grupos de Solos

Devido à variação em termos de composição, textura e estrutura dos solos, optou-se em realizar as análises segundo três principais eixos de estudo: o primeiro eixo realizou o estudo espectral de cada sensor (Landsat, ASTER e MODIS) de acordo com cada tipo de solo. Esse estudo visou caracterizar o comportamento espectral individual dos solos da região e para isso foram escolhidos dois tipos de solos com características geotécnicas muito distintas. O segundo eixo estudou o comportamento espectral de grupos de solos. Nesse caso, procurou-se agrupar as diversas variedades de solos em conjuntos que apresentassem características geotécnicas mais próximas. O último eixo de estudo procurou avaliar o comportamento espectral de todos os solos conjuntamente. Isso foi feito para se averiguar se mesmo apresentando grande variedade textural e composicional poder-se-ia criar um modelo que fosse sensível à variação da umidade do solo. Desta forma, de acordo com os três eixos de estudo os solos, cuja classificação utilizada foi a de Di Gennaro (2002), foram agrupados no Quadro 1.

Quadro 1: Três eixos de estudo e seus grupos de solos

Eixo de Estudo	Tipos de solos analisados	
1. Comportamento espectral individual de solos com características geotécnicas distintas	Solo B	Solos Calcários de Montanha Calcária - ocorrem em área com relevo íngreme ou muito íngreme A textura é média ou moderadamente grossa e apresentam boa disponibilidade de oxigênio
	Solos H & I	Solos de Terraço e de Planície Aluvionar - caracterizam-se por serem profundos ou muito e ocorrem em áreas planas. Desenvolvem-se sobre depósitos aluvionares. Textura média fina a moderadamente fina e com disposição de oxigênio moderada ou imperfeita.
2. Comportamento espectral de grupos de solos. Solos agrupados por apresentar características geotécnicas próximas.	Solos B, F e G	Solos Calcários de Montanha, Solos do Complexo Vulcânico e Solos de Planícies – solos com textura moderadamente grossa e boa disponibilidade de oxigênio.
	Solos D, E, H & I	Solos de Colina Interna, Solos de Colina Costeira e Solos de Terraço e de Planície Aluvionar - tendem a serem argilosos, com textura moderadamente fina a fina, com disponibilidade de oxigênio moderada, apresentando certa dificuldade da remoção da água.
3. Comportamento espectral de todos os tipos de solos	Todos os solos	- apresentando grande variedade textural e composicional.

### 4.3 Modelagem do Acumulado de Chuvas em função dos Dados Espectrais

A escolha do modelo adequado é uma tarefa difícil, em primeiro lugar deve-se levar em conta a relação entre as diversas variáveis independentes (no caso as bandas e índices de cada sensor) e a variável dependente (o acumulado de chuva). Neste estudo, a Análise de Correlação Múltipla e o Método de Grupo para Manipulação de Dados (GMDH) foram escolhidos para se estimar a relação entre a informação espectral (bandas, ou índices delas derivados) e a umidade do solo para cada sensor.

Como variáveis independentes foram utilizados:

- Para a imagem Landsat: os índices NDII, NDVI, *Tasseled Cap* banda umidade, a transformação de componentes principais (das bandas TM5 e ETM7) 1° e 2° componentes e a banda termal.
- Para as imagens ASTER: as bandas do infravermelho (SWIR), os índices NDII, NDVI, *Tasseled Cap* banda umidade e a temperatura superficial.
- Para as imagens MODIS: as bandas do visível e do infravermelho e a temperatura superficial noturna.
- Através da análise da correlação entre cada variável independente e as variáveis dependentes (acumulados de chuva) observou-se que o melhor acumulado de chuva a ser utilizado era o de 4 dias. Assim, os dados de acúmulo de chuva de 4 dias foram utilizados como variável dependente em todas as análises (AC4dias).

#### 4.3.1 Regressão Múltipla

O modelo de regressão linear múltipla permitiu calcular o valor da variável dependente (Acúmulo de chuva) como uma combinação das variáveis independentes, segundo a equação 3.

$$AC4dias = f(\text{Banda1, Banda2, ..., NDVI, NDII, ...}) \quad (3)$$

Um parâmetro avaliado foi o coeficiente de correlação múltipla ao quadrado ( $R^2$ ), ou como também é conhecido, coeficiente de determinação. O  $R^2$  deve variar entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 indicam um bom ajuste do modelo.

Há também o  $R^2$  ajustado que é utilizado para comparar modelos com um número diferente de variáveis independentes.

Geralmente, a função  $f()$  assume a forma de um modelo linear. Porém, segundo Johnson e Wichern (1988), as variáveis preditoras (independentes) podem entrar ou não como termos de 1° ordem, ou seja, é possível substituir estas variáveis por outras transformações, o problema maior no uso de modelos de regressão é o fato de não se conhecer o grau do polinômio que melhor descreve a relação entre as variáveis. Mais ainda, o modelo pode não ser necessariamente linear, nesse caso uma transformação, por exemplo, logarítmica, deve ser aplicada. Por este motivo, neste estudo, procedeu-se de maneira progressiva, começando pelo uso de modelos mais simples e aumentando

o grau do polinômio nas etapas seguintes.

Outro problema foi a seleção das variáveis mais significativas. Neste estudo, a combinação da regressão múltipla conjuntamente com o algoritmo GMDH foi um método eficiente de seleção das variáveis independentes e na modelagem de previsão do acumulado de chuva, de 2° ou 3° ordem.

#### 4.3.2 Método de Grupo para Manipulação de Dados (GMDH)

O GMDH, ou Group Method of Data Handling, é modelo de rede neural artificial (RNA) constituído de neurônios compostos por polinômios de baixa ordem. É um algoritmo que descreve a relação entre as variáveis baseado no conceito evolutivo de seleção natural. Consiste de um processo iterativo, no qual as variáveis independentes são combinadas progressivamente, de maneira a gerar modelos cada vez mais complexos.

O GMDH possui a capacidade de selecionar as entradas que não contribuem para a saída do modelo, portanto, nesse processo, as variáveis mais significativas são preservadas e as menos significativas descartadas.

O GMDH funciona com o ajuste dos parâmetros de expressões polinomiais simples,  $n$  e devido à simplicidade das operações realizadas e à menor quantidade de interações entre os “neurônios” ele tende a consumir menos recursos computacionais (BRAGA, 2013). Um esquema do algoritmo GMDH é mostrado na Figura 3.

Na primeira etapa, o algoritmo combina as variáveis de entrada usando polinômios simples, binômios de segundo grau, e procura binômios que melhor descrevem a variável dependente. Os melhores binômios são usados para gerar um novo conjunto de variáveis, as quais novamente são combinadas em pares e reavaliadas. Assim, dentro do processo iterativo, o grau do polinômio é aumentado e as variáveis mais significativas para o modelo são selecionadas e usadas para gerar um novo conjunto de variáveis, teoricamente mais significativas, enquanto as menos significativas são descartadas. Na medida em que um novo nível é criado identifica-se o melhor polinômio de previsão da variável e calcula-se seu erro. O número de camadas aumenta até que já não ocorra uma melhora na iteração ou até que se limite o

grau do polinômio. O elemento que apresenta o menor erro é escolhido e suas variáveis são substituídas.

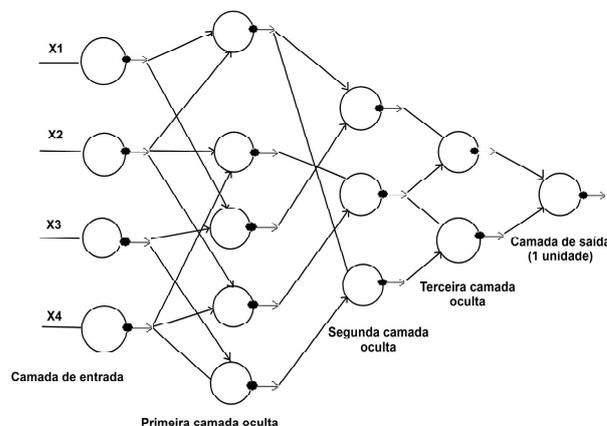


Fig. 3 - Esquema do algoritmo GMDH. Fonte: <http://ulcar.uml.edu/~iag/CS/Polynomial-NN.html>

Neste estudo, para a previsão da umidade do solo por meio do acumulado de chuva, todas as bandas e índices espectrais foram utilizados como variáveis de entrada no primeiro nível. Com estas variáveis, o algoritmo GMDH gerou polinômios em função do número de iterações estipulado.

No intuito de conduzir a seleção de variáveis, a metodologia adotada utilizou o algoritmo GMDH de duas formas: (1) com todas as variáveis independentes para cada sensor, limitando-se em um polinômio de 3° grau; (2) somente com as variáveis que produziram os melhores resultados nos modelos de regressão múltipla. Concomitantemente, uma segunda regressão múltipla foi aplicada utilizando a relação não-linear obtida no GMDH.

Assim, obtiveram-se duas análises do tipo regressão múltipla e duas análises do tipo GMDH. Desta forma, conseguiu-se selecionar uma combinação de variáveis independentes bastante significativa para a previsão do acumulado de chuvas.

O polinômio foi limitado a um polinômio de 3° grau por dois motivos: como a intenção neste estudo foi de gerar uma equação capaz de modelar a umidade do solo, para que este modelo tenha uma aplicabilidade grande é interessante que as equações sejam as mais simplificadas possível. O segundo motivo é o conhecido por

overfitting. Estudos anteriores (KISHI, 2001) reconhecem que quando o polinômio é de grau muito elevado o ajuste da função aproxima-se bem dos valores de entrada, porém gera erros na predição. Modelos com mais de 7 iterações se mostram instáveis.

#### 4.3.3 Verificação dos Resultados

Para a verificação dos resultados obtidos com as análises multivariáveis utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov. O Teste de Kolmogorov-Smirnov (teste de K-S) é aplicado, também no caso de amostras pequenas, para o estudo da igualdade estatística de duas populações. O teste de K-S procura diferenças entre a função de distribuição das duas populações baseada em dois grupos de amostras independentes. Sua vantagem é que não há comprometimento do teste se a distribuição dos dados não for normal, pois se trata de um teste não-paramétrico e de distribuição livre.

Neste estudo o teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado com o intuito de se avaliar se o valor predito pelo modelo coincide (ou é similar) ao valor observado em campo.

Comparativamente realizou-se o teste de correlação entre os dados observados e os dados obtidos nas modelagens.

A combinação entre o resultado do teste K-S e da correlação serviu para apontar qual a melhor modelagem para cada sensor e em que situação.

## 5. RESULTADOS

Para a análise dos resultados optou-se por realizar o teste Kolmogorov-Smirnov e a correção entre os dados obtidos por sensores e por tipo de solo.

### 5.1 Dados Landsat ETM

A modelagem realizada com as imagens Landsat ETM, foi eficiente somente para um tipo de solo, analisado isoladamente, que apresentou em seu modelo as variáveis: banda termal, o índice *Tasseled Cap* - umidade, além da banda termal ao quadrado. O Landsat ETM não apresentou resultados satisfatórios para outros tipos de solo, não podendo ser considerado eficiente na modelagem de um grupo heterogêneo de solos, não sendo, portanto, recomendado para elaboração de um modelo genérico de controle

da umidade do solo. A Tabela 1 apresenta os resultados dos testes Kolmogorov-Smirnov e de correlação para as imagens Landsat e os diversos agrupamentos de solo, utilizando o algoritmo GMDH. Observar que os resultados nesse caso não foram muito satisfatórios.

Tabela 1: Testes Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Correlação, Landsat, Algoritmo GMDH

Tipo de Solo	Teste K-S		Correlação	
	D	D crítica	Modelo	Val.
Solo B	0.25	0.43	0.59	-
	0.25	0.43	0.89	-
Solo H & I	0.2	0.54	0.67	-
	0.5	0.54	0.78	-
Solos B, F,G	0.31	0.48	0.64	0.60
	0.31	0.48	0.62	0.60
Solos D, E, H&I	0.27	0.44	0.19	0.40
	0.45	0.44	-0.36	-0.35
Todos os Solos	0.22	0.33	0.36	-0.06
	0.48	0.33	0.43	0.24

### 5.2 Resultados obtidos com imagens ASTER

A modelagem realizada com imagens ASTER indica como o comprimento mais eficiente o infravermelho, principalmente entre 2.185 – 2.225mm (SWIR3), 2.295 – 2.365mm (SWIR5) e 2.360 – 2.430mm (SWIR6). Os melhores modelos foram gerados por meio da regressão múltipla. As imagens ASTER mostraram-se eficientes na geração de um modelo genérico, que envolveu diversos tipos de solo, na detecção da umidade. Este modelo incluiu as bandas SWIR1(1.6 – 1.7µm), SWIR3(2.185 – 2.225mm), SWIR5 (2.295 – 2.365mm), temperatura superficial e o índice NDVI. A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes Kolmogorov-Smirnov e de correlação para as imagens Aster e os diversos agrupamentos de solo, utilizando regressão múltipla. Observar que os resultados neste caso são promissores.

Tabela 2: Testes Kolmogorov-Smirnov (K-S) e correlação, ASTER, Regressão

Tipo de Solo	Teste K-S		Correlação	
	D	D crítica	Modelo	Val.
Solo B	0.29	0.46	0,96	-
Solos H & I	0.29	0.46	0,91	0,95
Solos B, F,G	0.22	0.43	0.96	-
Solos D, E, H&I	0.31	0.48	0,99	0,58
Todos os Solos	0.26	0.39	0,94	0,52

### 5.3 Resultados obtidos com imagens MODIS

A modelagem realizada com imagens MODIS também mostra uma tendência de valorização das bandas do infravermelho, principalmente nos comprimentos 0.54 – 0.56 μm (M4), 1.62 – 1.65 μm (M6) e 2.10 – 2.15 μm (M7). As análises mais eficientes na elaboração do modelo foram tanto a regressão múltipla como o algoritmo GMDH. Na geração de um modelo genérico para o estudo da umidade do solo as variáveis presentes foram: banda M6 (1.62 – 1.65 μm), Temperatura Superficial Noturna ao quadrado e o produto entre as bandas M1 (0.62 – 0.67 μm) e M7 (2.10 – 2.15 μm). O modelo gerado apresenta um polinômio de segundo grau. As tabelas 3 e 4 apresentam os resultados dos testes Kolmogorov-Smirnov e de correlação para as imagens MODIS e os diversos agrupamentos de solo, utilizando regressão múltipla e o algoritmo GMDH. Observar que em ambos os casos os resultados são promissores.

Tabela 3: Testes Kolmogorov-Smirnov (K-S) e correlação, MODIS, Regressão

Tipo de Solo	Teste K-S		Correlação	
	D	D <sub>crítico</sub>	Modelo	Val.
Solo B	0.23	0.48	0,80	—
Solo H & I	0.23	0.48	0,90	—
Solos B, F,G	0.17	0.50	0,98	0,20
Solos D, E, H&I	0.27	0.46	0,92	0,80
Todos os Solos	0.23	0.37	0,87	0,85

Tabela 4: Testes Kolmogorov-Smirnov (K-S) e correlação, MODIS, GMDH

Tipo de Solo	Teste K-S		Correlação	
	D	D <sub>crítico</sub>	Modelo	Val.
Solo B	0.54	0.48	0.32	-
	0.23	0.48	0.73	-
Solo H & I	0.23	0.48	0.73	-
	-	-	-	-
Solos B, F,G	0.25	0.50	0.91	0.70
	-	-	-	-
Solos D, E, H&I	0.21	0.46	0.78	0.66
	0.21	0.46	0.85	0.62
Todos os Solos	0.23	0.37	0.92	0.78
	0.27	0.37	0.80	0.62

### 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS VOLTADA AO ESTUDO DE DESLIZAMENTOS

Um dos motivos para escolher trabalhar com a detecção da umidade do solo em uma região montanhosa, como a região de Campanha,

foi sua contribuição ao estudo de movimentos de massa, mais especificamente deslizamentos, comuns nessa região.

Nessa região, para que ocorram movimentos de massa, a concentração de água no solo pode ser muito inferior àquelas esperadas para o clima tropical. Para se determinar o valor crítico do acumulado de chuva, que neste estudo foi utilizado o acumulado de 4 dias (Ac4), por apresentar melhores valores de correlação individual entre os valores de chuva e os valores das bandas/índices. Idealmente porém, o valor crítico de Ac4 deve ser estimado por meio de estudos específicos ao longo de alguns anos e sua associação a deslizamentos. Uma hipótese utilizada foi a de valores próximos a 80mm para as regiões mais íngremes, considerando a tipologia de solos da região.

Utilizando esse valor e as equações genéricas (elaboradas para todos os tipos de solo), tanto das imagens ASTER como MODIS, pode-se mapear as áreas consideradas como críticas a escorregamentos. Para exemplificar, criou-se uma imagem umidade para a região da estação pluviométrica de Acerra.

Para gerar a imagem umidade do solo, com 1km de resolução espacial, foi utilizada a imagem MODIS de 06 de abril de 2003, e a equação 4.

$$Ac4 = 531.9844 * M6 + 1124.8001 * TSN - 1605.8043 * M1 * M7 - 811.6964 * TSN^2$$

(4)

sendo:

Ac4: acumulado de 4 dias de chuva

M1: MODIS, banda 1 (0.62 – 0.67 μm)

M6: MODIS, banda 6 (1.62 – 1.65 μm)

M7: MODIS, banda 7 (2.10 – 2.15 μm)

TSN: Temperatura Superficial Noturna.

A imagem umidade indica a quantidade de umidade (em mm) distribuída espacialmente na área. Após aplicar a equação 4 a imagem resultante foi classificada em categorias de acordo com o valor de Ac4. Desta forma, foram obtidas categorias cujos valores de Ac4 são 0mm (em vermelho), correspondentes portanto a baixa umidade e categorias de alta umidade, ou seja, valores de Ac4 acima de 80mm (em verde escuro), Figura 4.

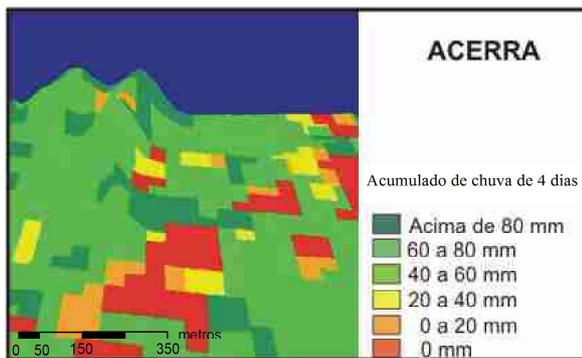


Fig. 4 - Imagem da umidade do solo gerada a partir da modelagem de imagens MODIS e Modelo Digital para a Estação de Acerra.

Como os valores acima de 80mm representam alta umidade, os locais indicados pela imagem umidade com estes valores, representariam, portanto, áreas com maior probabilidade de ocorrer deslizamento de terra (quando associadas a declividade alta e média).

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que é possível modelar a umidade do solo e sua distribuição espacial a partir da análise multitemporal de imagens multiespectrais em escala de semidetalhe e regional. Em todos os três sistemas Landsat ETM, ASTER e MODIS, há uma tendência a valorização dos comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio, principalmente das imagens termais ou de temperatura superficial.

Conclui-se que os sistemas ASTER e MODIS, são eficientes na determinação da umidade do solo independentemente das variações texturais e de composição dos solos e podem ser, portanto, utilizados em modelos genéricos de umidade. As imagens ASTER podem ser empregadas quando há necessidade de maior resolução espacial e as imagens MODIS quando o fator mais importante for a resolução temporal.

Este estudo mostrou-se eficiente em regiões parcialmente cobertas por vegetação ou com solo exposto sendo recomendado que regiões densamente vegetadas seja estudada a influência da vegetação no parâmetro umidade.

Por fim, conclui-se que essa modelagem pode vir a ser empregada em sensores de alta resolução que apresentem cobertura espectral

na região do infravermelho, dessa forma, sensores como Rapid Eye podem vir a ser promissores na modelagem da umidade do solo com vistas a diversas aplicações, especialmente a deslizamentos de terra.

## AGRADECIMENTOS

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela possibilidade de realização deste estudo, à CAPES pelo provimento de bolsa de estudo e ao Prof. Mario Ferri, da Universidade de Nápoles, que colaborou com estudos desenvolvidos na Itália.

## REFERÊNCIAS

ACCIOLY, L. J. DE O.; OLIVEIRA, M. J. A. DE; SILVA, F. H. B. B. DA; Avaliação de Mudanças no Albedo do Núcleo de Desertificação do Seridó através de Imagens Landsat TM. In: Congresso Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu. *Anais*, 2001. p. 549-556.

BRAGA, A.L.S. **Redes Neurais baseadas no Método de Grupo de Manipulação de Dados: treinamento, implementação e aplicações.** 2013. 132f. Tese (Doutorado em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

DI GENNARO, A. **I sistemi di terre della Campania.** Carta 1:250.000 e Legenda. Napoli: RISORSA e Regione Campania, 63p, 2002.

JOHNSON, D. E. **Applied Multivariate Methods for Data Analysts.** New York. Duxbury Press, 425p, 1998.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis.** 2. ed. New Jersey: Prentice Hall International, 816p, 1988.

KISHI, R.T. Estudo das Relações entre nitrato nas águas superficiais e o uso do solo. *Série em Ciências Geodésicas*, v.1, p. 243-257, 2001.

LOPES, H. L.; ACCIOLY, L. J. DE O. ; SILVA, F. H. B. B.; SOBRAL, M.C.M.; ARAÚJO FILHO, J.C.; CANDEIAS, A.L. B. Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, n. 9,

- p.973–980, 2011. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em: jan. 2015.
- MAFFRA, C. Q. T.; CENTENO, J.A.S. The Use of Remote Sensing for Soil Moisture Detection: Application in the Study of Mass Movements. In: 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 2002, Buenos Aires. **Proceedings**, 2002. CD.
- NICHOL, J.; WONG, M.S. Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion. In: **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 9, p. 1913-1926, 2005.
- VAN VESTEN, C. J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S.L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. In: **Engineering Geology**, v.102, p.112-131, 2008.
- VIVONI, E. R.; GEBREMICHAEL, M.; WATTS, C. J.; BINDLISH, R.; JACKSON, T. J. Comparison of ground-based and remotely sensed surface soil moisture estimates over complex terrain during SMEX04. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.314-325, 2008.
- YICHANG, W.; FANG, Z.; LIPING, Z.; LINGLING, K.; XIAOQIANG, L. Estimating soil moisture in semi-arid region by remote sensing based on TM data. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.1, p.1-5, 2010.
- ZENG, Y.; FENG, Z.; XIANG, N. Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.6, p.4036-4039, 2004. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1370089/?reload=true> <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1370089/>>.