

## **Interferometria SAR e geração de MDE's interferométricos em aplicações geomorfológicas**

Ericson Hideki Hayakawa<sup>1</sup>  
Daniel Luís Andrade e Silva<sup>1,2</sup>  
Thiago de Castilho Bertani<sup>1</sup>  
Bruno Rodrigues do Prado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

<sup>2</sup> Diretoria de Serviço Geográfico - DSG  
QGEx - Bloco "F" - SMU - 70630-901 - Brasília - DF, Brasil

[ericson@dsr.inpe.br](mailto:ericson@dsr.inpe.br)  
[andrade@dsr.inpe.br](mailto:andrade@dsr.inpe.br)  
[thiago.bertani@cptec.inpe.br](mailto:thiago.bertani@cptec.inpe.br)  
[prado@dsr.inpe.br](mailto:prado@dsr.inpe.br)

### **Resumo**

A caracterização geomorfológica da superfície terrestre e o monitoramento de eventos decorrentes de catástrofes naturais ou por influência humana tornam-se necessários, principalmente em áreas com riscos de prejuízos econômico e humano. Nesse contexto, o presente trabalho versa sobre a tecnologia InSAR (Interferometria por Radar de Abertura Sintética) e MDE's (Modelos Digitais de Elevação) interferométricos aplicados na geomorfologia e na verificação de dinâmicas da superfície terrestre. Apresenta-se a técnica de geração de MDE's por InSAR e suas possíveis formas de aplicação em estudos geomorfológicos.

Palavras-chave: interferometria SAR, MDE, geomorfologia, dados geomorfométricos

### **Abstract**

Geomorphologic characterization and natural hazards or influenced by human activities monitoring events are necessary, principally in human and economic risks areas. In this context, this study relates the InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometric) technology and interferometric DEM's (Digital Elevation Models) applied on geomorphology and on surface dynamics verification. Introduce the InSAR-DEM technique and the possible applications in geomorphology studies.

Keywords: SAR interferometry, DEM, geomorphology, geomorfometry data.

### **1. Introdução**

Segundo Christofolletti (1981), a Geomorfologia é a ciência que estuda a gênese e a evolução das formas de relevo sobre a superfície terrestre. Interessa à ciência geomorfológica não

somente processos pretéritos ocorridos nos litotipos existentes, mas também os reflexos de eventos naturais e de atividades antrópicas que agem sobre a estabilidade das formas de relevo.

Com o desenvolvimento e os lançamentos dos primeiros satélites, os geomorfólogos passaram a contar com uma importante fonte de dados. A integração entre o Sensoriamento Remoto e a Geomorfologia obteve sucesso devido à facilidade em se realizar análises geomorfológicas de âmbito qualitativo e quantitativo da superfície da Terra (Cattani *et al.*, 2005). A descrição geomorfológica tornou-se mais detalhada e o monitoramento tornou-se mais integrado às dinâmicas. Os dados orbitais permitiram a obtenção de informações geomorfológicas em curtos intervalos de tempo e espaço, o que melhora a representatividade do relevo, fundamentais em estudos que contemplam o seu monitoramento.

No que tange os imageadores RADAR (acrônimo de *Radio Detection And Ranging* - Detecção e Telemetria pelo Rádio), a disponibilidade da tecnologia SAR (Radar de Abertura Sintética), a partir do lançamento do SEASAT (o primeiro SAR civil lançado em 1978), impulsionou a sua aplicação em geomorfologia. Isto se deve a própria natureza do imageador radar. Com operação na porção que compreende as microondas no espectro eletromagnético, os radares imageadores são sistemas ativos que possuem comprimentos de onda que variam de 1 cm até 1 m. Sua principal característica é a possibilidade de extração de informações referentes às propriedades elétricas (influenciada pela umidade) e físicas (geometria e forma) dos objetos da superfície (Henderson e Lewis, 1998).

Parâmetros definidos pelo próprio sistema (comprimento de onda ou frequência, polarização, geometria de visada e resolução espacial), e pelos parâmetros da superfície (rugosidade, material do alvo, índice de umidade, ângulos de inclinação e orientação da superfície), otimizam a caracterização da morfologia da superfície terrestre. Por se tratar de um sistema ativo, e com maior comprimento de onda, o radar imageador não depende da reflexão da iluminação solar e das condições atmosféricas. Assim, em áreas como a região amazônica, tornam-se fundamentais, pois vencem intervenientes como nuvens, fumaça, bruma e chuva, os quais restringem o uso de sensores ópticos (Paradella, 2005). Ademais, o radar imageador possui capacidade de penetrar até o dossel da vegetação (depende do comprimento de onda e densidade da vegetação).

Contribuição adicional aos estudos geomorfológicos se deve ao desenvolvimento da técnica de Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR), descrita inicialmente por Graham (1974). Em suma, a técnica baseia-se na propriedade de que dois sinais de onda coerentes espalhados pela mesma superfície podem, em certas condições, ser interferometricamente processados. A fase interferométrica resultante desse processo é a diferença de fase entre os dois sinais espalhados, os quais estão relacionados à topografia do terreno. A partir desses processamentos, é possível a geração de modelos digitais de elevação (MDE's).

Dentro desse contexto, o presente trabalho versa sobre a geração de MDE's interferométricos e suas aplicações na Geomorfologia. Em seu desenvolvimento, apresenta-se a técnica de geração de MDE por InSAR e as possíveis formas de aplicação em estudos geomorfológicos.

## **2. Interferometria-SAR (InSAR)**

A Interferometria-SAR baseia-se na propriedade de que dois sinais de onda coerentes espalhados pela mesma superfície podem, em certas condições, ser interferometricamente processados. Esse processamento interferométrico envolve duas imagens SAR adquiridas do mesmo terreno, por dois diferentes modos:

a) Utilizando-se duas antenas montadas na mesma plataforma numa direção perpendicular à direção do vôo e separadas por uma distância chamada de linha-base (B). Este modo é conhecido como interferometria de uma passagem (*single pass interferometry*), utilizada geralmente em plataformas aerotransportadas. Neste caso, o sinal eletromagnético é emitido por uma das antenas e o retorno resultante do retroespalhamento é recebido por ambas, gerando-se ao mesmo tempo as duas imagens SAR da mesma cena. A vantagem desse tipo de aquisição é o fato de possuir uma linha-base fixa que pode ser medida com precisão.

b) Utilizando-se uma única antena com duas passagens paralelas em diferentes tempos sobre a mesma área. Este tipo é chamado de interferometria de duas passagens (*two pass interferometry*) ou de passagens repetidas (*repeat pass interferometry*). Nesse caso a linha-base (B) depende da distância entre as duas passagens, devendo ser calculada a partir dos dados de vôo

das respectivas plataformas. Nos SAR's orbitais, a linha-base é calculada a partir dos parâmetros orbitais dos satélites.

O par de imagens adquirido em qualquer um desses modos possui formato complexo, permitindo obter informações de amplitude e fase.

## 2.1 Equacionamento InSAR

A figura 1 ilustra o processo de aquisição das imagens para a geração da fase interferométrica através do uso duas antenas na mesma plataforma, separadas por uma distância chamada de linha-base (B). A relação entre a diferença de fase “ $\Delta \varphi$ ” entre dois sinais de onda de comprimento “ $\lambda$ ” e a diferença das distâncias do alvo às antenas  $A_1$  e  $A_2$  (“ $r$ ” e “ $r + \Delta r$ ”) dada por ( $\Delta r$ ) é mostrada pela expressão 1:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta r) \quad (1)$$

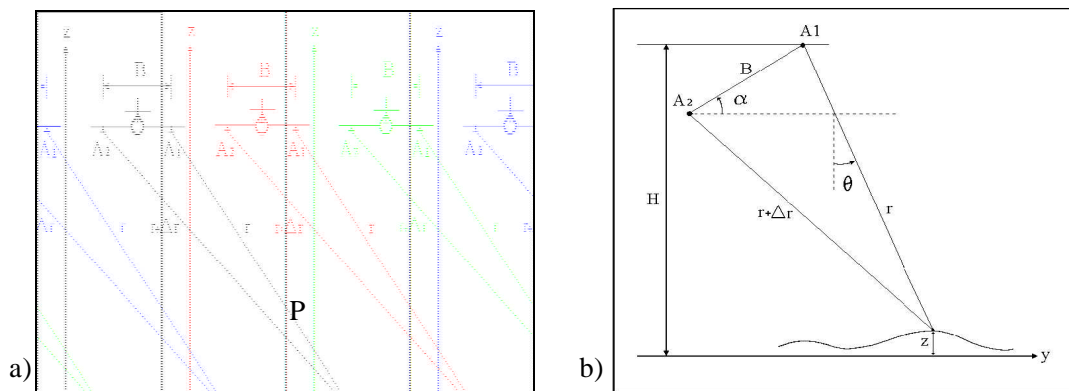


Figura 1: a) Modo de aquisição utilizando duas antenas; b) geometria básica de um sistema interferométrico. (Fonte: Mura, 2000).

A variação de distância ( $\Delta r$ ) e conseqüentemente a variação de fase ( $\Delta \varphi$ ) dependem do comprimento da linha-base (distância entre  $A_1$  e  $A_2$ ). Uma linha-base muito pequena faz com que se detecte uma diferença de fase muito pequena para um mesmo ponto. Se a linha-base for muito grande, a fase se torna ruidosa devido à decorrelação espacial, causada pelas diferentes geometrias de aquisição.

A Interferometria-SAR utiliza a informação de  $\Delta \varphi$ , obtida através da diferença de fase entre as duas imagens para gerar a informação de  $\Delta r$ , e conseqüentemente obter o valor de elevação de um determinado ponto. O conhecimento das condições de imageamento, tais como: a altura H, a linha-base B e os vetores de estado (velocidade e posicionamento) das antenas  $A_1$  e  $A_2$  são essenciais nesta tarefa. A partir do triângulo genérico compreendido pelos pontos  $A_1$ ,  $A_2$  e P, e conhecendo-se o ângulo de incidência  $\theta$ , e a distância “r” de um ponto genérico P, chega-se ao valor da elevação deste ponto, expressa na seguinte relação:

$$z(r, \theta) = H - r \cos \theta \quad (2)$$

## 2.2 Processamentos interferométricos

Como resultado dos processamentos interferométricos, obtém-se produtos que possuem múltiplas finalidades. Dentre os produtos, têm-se os interferogramas complexos. Estes consistem em imagens nas quais cada *pixel* contém informação de amplitude e fase interferométrica, correspondentes aos seus *pixels* homólogos nas imagens que os geraram.

A obtenção da fase interferométrica,  $\Delta \varphi$ , depende primeiramente de um registro preciso, de ordem sub-*pixel*, das imagens complexas. Após o registro das imagens complexas, o interferograma é gerado por um processamento que consiste na multiplicação dos *pixels* complexos da primeira imagem pelos respectivos *pixels* complexos conjugados da segunda imagem. A fase associada a cada *pixel* do interferograma resultante, corresponde à diferença de fase relativa aos respectivos *pixels* homólogos do par de imagens complexas, ao passo que a amplitude no interferograma é o produto das amplitudes associadas aos *pixels* homólogos.

O cálculo computacional da fase interferométrica apresenta um resultado modulado limitado em  $2\pi$ , devido ao fato de que os *softwares* não diferenciam arcos cômgruos. Isto promove um erro na determinação dessa fase, o que gera, a chamada fase “dobrada”. Assim, os interferogramas são caracterizados por padrões do tipo franjas.

Para que a fase interferométrica possa ser utilizada na obtenção de informação de altura do terreno, o seu caráter cíclico limitado em  $2\pi$  deve ser removido, ou seja, é necessário transformar a fase relativa em fase absoluta. Essa necessidade de se calcular a fase absoluta

implica na execução de um tipo específico de processamento interferométrico, definido como “desdobramento de fase” (Figura 2).

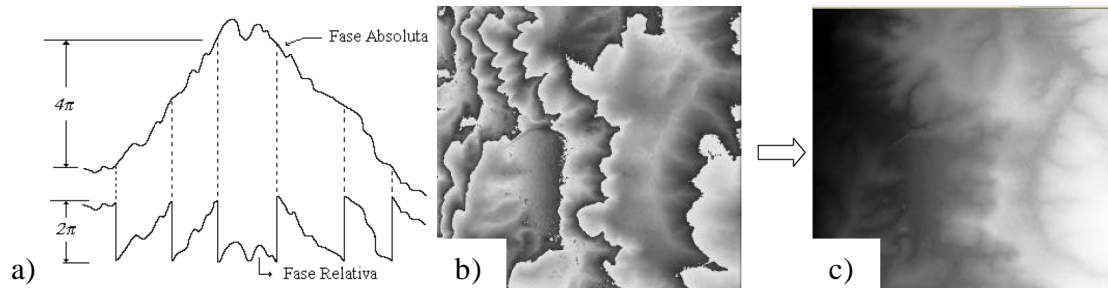


Figura 2: a) Processo de desdobramento “*unwrapping*” em uma dimensão; b,c) ilustração do desdobramento bidimensional. Fonte: Mura, (2000).

Antes do “desdobramento de fase”, deve-se remover a fase plana, a fim de se eliminar a componente da fase devida à terra plana, mantendo apenas a componente devida à topografia. Essa remoção é justificada pelo fato de que o efeito de terra plana na determinação da fase interferométrica introduz um erro que aumenta linearmente na direção perpendicular ao voo (“direção em *range*”). Devido a esse erro, o interferograma se apresenta com valores desviados em relação aos esperados. Após o processamento de desdobramento de fase, a componente de fase removida deve ser novamente inserida para o cálculo da fase absoluta.

Em uma situação ideal, a fase interferométrica obtida pelo processamento deve-se unicamente à diferença de percurso do sinal. Entretanto, ruídos inerentes ao sistema e à interação radar-alvo alteram a fase do sinal e provocam a degradação da qualidade do interferograma. A razão do aparecimento destes ruídos é a descorrelação entre as duas imagens. Sendo assim, após a fase ser desdobrada, ainda deve ser considerada a presença de ruído de fase, que impede que seja feita apenas uma integração simples das fases dobradas.

A conversão da fase absoluta em medida de elevação do terreno é realizada em cada uma das linhas da matriz de fase absoluta, supondo-as paralelas à direção de *range* e supondo também que o primeiro ponto de cada uma dessas linhas corresponde ao ângulo de incidência inicial  $\theta_i$ . O método utilizado para tal transformação consiste em integrar o ângulo de incidência

por toda a faixa imageada, ou seja, de  $\theta_i$  até  $\theta_f$ , em  $N$  passos, correspondente ao número de pontos de uma linha da matriz de fase absoluta.

Conhecendo-se a fase absoluta e o ângulo de incidência de cada um dos “n” pontos, a altitude  $H$  da antena de referência e a linha-base  $B$ , podem-se calcular a elevação de cada um dos “n” pontos. Devido a erros na determinação do posicionamento da plataforma, podem ocorrer imprecisões sistemáticas no modelo de elevação obtido. Para que o modelo tenha uma melhor precisão, é necessária a utilização de pontos de controle (coordenadas plani-altimétricas) na área imageada, principalmente para sistemas orbitais onde os erros de posicionamento são maiores.

### **3. InSAR e MDE aplicados a geomorfologia**

De modo geral, o monitoramento de eventos do ambiente físico e a caracterização geomorfológica foram amplamente beneficiadas pela tecnologia InSAR, e a geração de MDE interferométricos. Como as diferenças de fase entre os dois sinais espalhados estão relacionadas à topografia do terreno, a tecnologia InSAR permite a detecção de deslocamentos da superfície terrestre na ordem de centímetros. Tal fato permite o monitoramento e a avaliação dos efeitos de eventos decorrentes de catástrofes naturais ou de influência antrópica. Por meio da interferometria SAR podem ser obtidos dados referentes aos efeitos provocados por terremotos, verificar áreas com movimentos de massa, identificar áreas de soerguimento e subsidência de terrenos, avaliar taxas de erosão e deposição de sedimentos, dentre outros. Tais informações são essenciais, principalmente em áreas com riscos de prejuízos econômico e humano.

Quanto à geração de MDE's por InSAR, devido às propriedades do radar imageador, pode-se adquirir dados em regiões de difícil acesso ou onde a base cartográfica e o mapeamento geomorfológico são escassos e/ou generalizantes. Em suma, a aplicação de um MDE em geomorfologia pode ser delineada de forma qualitativa ou quantitativa. A abordagem qualitativa baseia-se na interpretação visual. A partir dos elementos-chaves de interpretação (sombra, densidade, localização, tamanho, forma, tonalidade e cor, textura), promove-se a identificação e subsequente análise da superfície, resultando no delineamento e mapeamento das características geomórficas da área em questão (Verstappen, 1977). Já a abordagem quantitativa visa à extração de medidas da superfície. Com um MDE, extraem-se variáveis morfométricas como declividade, orientação das vertentes, comprimento de rampa, curvatura vertical e curvatura horizontal,

amplitude altimétrica, rede de drenagem, dentre outros.

Como a análise quantitativa muitas vezes elimina o caráter subjetivo da análise qualitativa, a obtenção desses parâmetros tornou-se freqüente em estudos que contemplam a modelagem e classificação do ambiente. A obtenção das variáveis morfométricas não disponibiliza apenas medidas do relevo, mas permite inferir sobre dinâmicas que são influenciadas diretamente pelo relevo. Por exemplo, a partir da declividade, pode-se verificar a erosão, escoamento superficial e de sub-superfície. A curvatura vertical e horizontal permite verificar processos de migração e acúmulo de água e sedimentos causados pela gravidade. A altitude infere sobre variações climáticas (temperatura e pressão) decorrentes na mudança de topografia. A orientação da vertente permite verificar o plano de maior irradiação solar e a taxa de evapotranspiração. Com o comprimento de rampa pode-se verificar o comportamento do escoamento superficial.

Embora seja grande o potencial de um MDE na extração de variáveis morfométricas, os esforços despendidos ainda são pouco expressivos. No Brasil são desenvolvidas principalmente no projeto TOPODATA (Valeriano, 2005). Apoiando-se principalmente nos dados obtidos pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizaram-se metodologias operacionais referentes à extração de variáveis como declividade (Valeriano, 2002), orientação de vertentes, curvatura horizontal (Valeriano e Carvalho Júnior, 2003), curvatura vertical (Valeriano, 2003), além de extração de rede de drenagem (Valeriano et al., 2006), divisores de água e valores de altimetria (Figura 3).

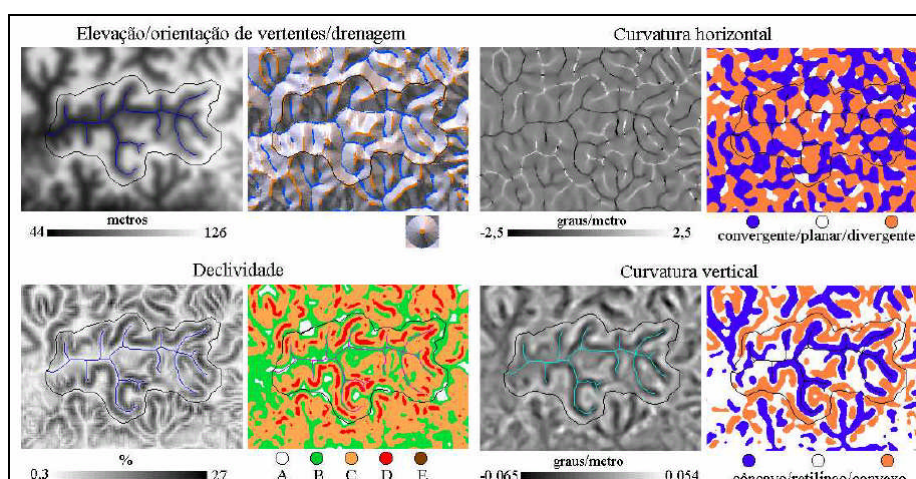


Figura 3 - Exemplos de variáveis morfométricas extraídas de um MDE. (Fonte: Valeriano, 2005)



As extrações de tais atributos permitem não só a descrição do relevo, mas também a obtenção de informações sobre unidades geológicas, interpretação de ambientes fluviais, identificação de paleoformas, distinção de diferentes categorias de superfície, identificação de feições estruturais, identificação de tipos de formas e nível de dissecação do relevo, dentre outros, os quais integrados permitem um entendimento das dinâmicas da paisagem de forma holística.

Entretanto, mesmo que a extração de variáveis morfométricas garanta o caráter quantitativo na análise, sua utilização deve ser empregada com cuidados para que não gerem resultados equivocados. Feições antrópicas como estradas, pontes, cortes no terreno, dentre outros, podem resultar em conclusões falaciosas, principalmente se interpretadas como feições naturais (WLADIS, 1999). Assim, a utilização de elementos auxiliares como: dados de medidas de campo, mapas topográficos, mapas de solos e rochas, mapas de vegetação, calibração dos equipamentos, podem contribuir na geração de resultados pertinentes. A experiência do intérprete também é fundamental. Tanto no âmbito quantitativo como no qualitativo, é imprescindível que o pesquisador possua conhecimento teórico e experiência prática suficientes para detectar as menores nuances inerentes à morfologia da superfície.

#### **4. Considerações finais**

Como observado, dados disponíveis de sensoriamento remoto tornam-se peças fundamentais em estudos de cunho geomorfológico. A caracterização geomorfológica tornou-se mais detalhada, e o monitoramento das dinâmicas da superfície passou a ser realizado com mais fidelidade. Além da identificação das peculiaridades da superfície, também auxilia em projetos de modelagem de bacias hidrográficas, confecção de mapas de áreas suscetíveis a inundações, localização de áreas de passíveis de erosão e/ou deposição, movimentos de massa, dentre outros que, por conseguinte auxiliam em ações de gerenciamento e planejamento.

#### **Referências**

Catani, F; Farina, P; Moretti, S.; Nico, G.; Strozzi, T. (2005) On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: Estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology*, v. 66, p. 119-131.

Christofolletti, A. (1981) *Geomorfologia*. São Paulo : Editora Edgard Blucher.

Graham, L.C. (1974) Synthetic interferometric radar for topographic mapping. Proceedings of the IEEE, v. 62, n. 6, p. 763-768.

Henderson, F. M.; Lewis, A. J. (1998) Principles and applications of imaging radar. United States of America, John Wiley & Sons, Inc.

MURA, J. C. (2000) Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: Sistema Geo-Insar. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 159 p.

Paradella, W. R.; Santos, A. R.; Veneziani, P.; Cunha, E. S.P. (2005). Radares imageadores nas geociências: estado da arte e perspectivas. Revista Brasileira de Cartografia, 57 (1): 56-62.

Valeriano, M. M. (2002) Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. Espaço e Geografia, 1 (5): 69-85.

Valeriano, M. M.; Carvalho Junior, O. A. (2003) Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. Revista Brasileira de Geomorfologia, 1:17-29.

Valeriano, M. M. (2003) Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 3(7): 539-546.

Valeriano, M. M. (2005) Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, Brasil. Anais...São José dos Campos, INPE, 3595-3602.

Valeriano, M.M.; Kuplich, T. M.; Storino, M.; Amaral, B.D.; Mendes Junior, J. N.; Lima, D.J. (2006). Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with shuttle radar topographic mission-90m data. Computers & Geosciences, 32:1169-1181.

Valeriano, M.M. (2008) Dados topográficos. In: FLORENZANO, T.G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo, Oficina de textos.

Verstappen, H. T. (1977) Remote sensing in geomorphology. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company.

Wladis, D. (1999) Automatic lineament detection using digital elevation models with second derivative filters. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 4(65): 453-458.