

# APLICAÇÕES DE MODELOS NUMÉRICOS DE ELEVAÇÃO E INTEGRAÇÃO COM IMAGENS DIGITAIS

Carlos Alberto Felgueiras  
Guaraci José Erthal

Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT  
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Departamento de Processamento de Imagens - DPI  
Caixa Postal 515 - 12201 - São José dos Campos - SP

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivos principais: introduzir os conceitos básicos de definição, criação e utilização de Modelos Numéricos de Elevação (MNE's), bem como descrever e discutir as principais aplicações desses modelos e a integração dos mesmos com imagens digitais.

## ABSTRACT

The main aims of this work are: to show the definition, creation and use concepts of Digital Elevation Models (DEM's); and to describe and analyse the DEM applications and their integration with digital images.

## 1. INTRODUÇÃO

A motivação para estudo e implementação computacional de aplicações de Modelos Numéricos de Terreno (MNT's) está associada ao desenvolvimento de um Sistema de Informações Geográficas que ora se realiza no Instituto de Pesquisas Espaciais de São José dos Campos (INPE - SJC).

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) permite integrar, numa única base de dados, informações provenientes de diversas fontes, tais como: mapas temáticos (mapas políticos, de rodovias, de rios, etc...), dados de MNT's (mapas de contornos, de declividade, etc...), imagens (de satélite, de aerolevantamentos, etc...) e ainda dados tabulares na forma não gráfica. O objetivo principal de um SIG é o de combinar os dados relacionados acima e obter mapeamentos derivados que forneçam subsídios para tarefas como: monitoração de recursos ambientais, geração automática de mapas cartográficos, cadastramento rural e urbano, planejamento regional e urbano, etc....

O SIG do INPE está implementado em microcomputador de 16 bits, compatível com a linha IBM-PC, e foi

desenvolvido em linguagem C sob o sistema operacional DOS .

## 2. OS MODELOS NUMERICOS DE ELEVAÇÃO

### 2.1 Definição

Os Modelos Numéricos de Terreno, MNT's, representam a variação de uma determinada característica associada a cada ponto de uma porção de terreno (superfície terrestre). Dentre as características modeladas mais utilizadas pode-se distinguir: temperatura, altimetria, batimetria, concentração de teores geoquímicos e geofísicos, etc... Quando a característica modelada é a elevação do terreno (altimetria ou relevo) esse modelo é chamado Modelo Digital de Elevação (MDE) ou Modelo Numérico de Elevação (MNE). Neste trabalho serão abordadas apenas aplicações relativas a Modelos Numéricos de Elevação, porém, algumas aplicações, tais como projeção geométrica planar e geração de mapas de contornos, podem ser utilizadas, sem restrições, com representações de outras características de terreno.

### 2.2 Geração do modelo

O MNE é gerado a partir de um conjunto de amostras  $((x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n)$ , obtidas de uma

superfície real. As coordenadas x e y estão associadas a distribuição espacial das amostras e as coordenadas z representam os valores atribuídos a altimetria do terreno que se quer modelar.

O processo de geração dos MNE's envolve duas fases distintas: a aquisição das amostras e a elaboração do modelo.

A fase de aquisição das amostras compreende a coleta de um conjunto de pontos,  $((x_i, y_i, z_i))$ , do superfície real onde se irá trabalhar. Esta fase é determinante na qualidade final do modelo gerado. A amostragem pode ser regular ou irregularmente espaçada mas não deve ser aleatória. Deve-se escolher como amostras aqueles pontos cujos valores de cota sejam representativos do comportamento da característica do terreno que se quer modelar.

A fase de elaboração do modelo envolve a transformação do conjunto de amostras gerado, na fase anterior, num modelo digital que irá representar a superfície. Os modelos digitais de terreno mais usados nos sistemas comerciais atuais são os modelos de grade poligonais com destaque para os modelos de grade triangular e retangular regular. Os primeiros devem ser usados para aplicações que requerem maior grau de precisão pois estes são gerados diretamente sobre o conjunto de amostras. Porém a geração dos modelos de grade triangular requerem algoritmos mais elaborados e estruturas de dados mais complexas para armazenamento dos triângulos e suas relações topológicas. Os modelos de grade retangular regular, encontrado com maior frequência nos sistemas existentes, são mais simples de serem gerados e utilizados pelos programas de aplicações. Esses modelos não requerem estruturas complexas para armazenamento e ocupam espaço reduzido de memória comparados com os de grade triangular. Para aplicações de caráter qualitativo, como em projeções geométricas planares do modelo, produzem resultados estéticos superiores ao modelo triangular.

A partir de um modelo de grade pré-estabelecido pode-se gerar um MNT Imagem que nada mais é do que um MNT refinado para a resolução de uma imagem qualquer e cujos valores de cota variam na faixa de 0 a 255. Neste caso cria-se uma tabela que mapeia essa faixa de valores para os valores de cotas reais do terreno.

## 2.3 Utilização do modelo

O processo de utilização do modelo, também conhecido, na literatura da área, como aplicações sobre o modelo, envolve o uso do modelo gerado para obtenção de resultados relevantes sobre a superfície de interesse sem a necessidade de trabalhar diretamente na região original. Dentre as aplicações mais comumente encontradas podemos destacar: projeções geométricas planares; geração de mapas de contornos; geração de mapas de declividade; plotagem de perfis do terreno; determinação da intervisibilidade entre pontos do modelo; cálculos para projetos de engenharia (volumes, barragens, estradas, etc.); simulação de terrenos; etc... Além destas podemos destacar ainda as aplicações que podem ser usadas em combinação com imagens digitais das quais podemos citar: correção geométrica de imagens de satélite (Spot, Landsat); correção radiométrica de imagens para melhora do processo de classificação de imagens multispectrais; e integração de MNT e imagem em transformação do tipo IHS.

## 3. APLICAÇÕES DE MNE's

### 3.1 Projeções Geométricas Planares

As projeções geométricas planares de Modelos Numéricos de Elevação permitem a visualização do modelo em projeção perspectiva ou paralela.

As projeções podem ser realizadas sobre modelos de grade triangular ou retangular. Os modelos de grade retangulares são, esteticamente, mais adequados para serem visualizados em projeções geométricas planares.

Para se ter uma visualização mais realística do modelo torna-se necessário o eliminação das linhas que não são vistas pelo espectador de acordo com sua posição em relação a superfície. O problema de escondimento de linhas é o que apresenta maior custo computacional na obtenção do modelo projetado.

### 3.2 Geração de Mapas de Contornos

O mapa de contornos ou mapa de isolinhas é um mapa que contém curvas que unem entre si pontos de uma superfície que tenham um mesmo valor de cota. As isolinhas podem ser

visualizadas como sendo a projeção ortogonal, no plano de distribuição espacial dos dados, das intersecções entre a superfície e uma família de planos horizontais equidistantes.

Os mapas de contornos apresentam algumas propriedades importantes:

- Todas as curvas são fechadas, a menos que interceptem as fronteiras de definição do mapa.

- As curvas de isovalores jamais se cruzam.

- O mapa de isolinhas fornece informações de caráter quantitativo podendo-se efetuar medidas, tais como inclinação e distância, e cálculos, tais como áreas e volumes, diretamente do mapa.

O mapa de contornos pode ser obtido de modelos de grade triangular ou retangular. Os modelos de grade triangular são mais adequados para a produção do mapa de contornos pois utilizam diretamente os pontos amostrados na geração do modelo. Isto possibilita uma precisão maior no resultado final do processo. Apesar disso muitos sistemas geram as isolinhas utilizando modelos de grade retangular por serem de manipulação mais simples e o processo de geração do mapa ser mais rápido computacionalmente.

### 3.3 Geração de Mapas de Declividade

Os mapas de declividade fornecem, para cada posição espacial do modelo, a informação da inclinação do terreno naquela posição. A obtenção desse mapa se faz analisando a cota do modelo na posição desejada e as cotas dos seus pontos vizinhos.

Devido ao fato da declividade em cada ponto do terreno ser uma grandeza vetorial, a maioria dos sistemas de MNT's existentes fornecem dois tipos mapas : o mapa do módulo da declividade ("slope") e o mapa de direção da declividade ("aspect"). O primeiro representa os módulos dos vetores de declividade e o segundo a orientação do vetor declividade para cada ponto do terreno.

### 3.4 Extração de Perfis do Terreno

Os perfis do terreno são obtidos a partir da análise das cotas do modelo em "caminhos", definidos pelo usuário sobre o terreno. Esses

caminhos podem ser definidos interativamente pelo usuário utilizando uma representação do modelo, mostrada numa unidade de visualização, que pode ser um mapa de isolinhas ou uma imagem representativa do terreno. Esses caminhos são linhas poligonais definidas no plano de distribuição espacial do modelo. Uma vez definidos os caminhos de interesse, os perfis são apresentados graficamente numa unidade visualizadora.

A análise desses perfis por especialistas é de grande valia em diversas áreas de aplicações tais como, Comunicações, Engenharia Civil, etc... Em comunicações, por exemplo, pode-se querer analisar perfis para a colocação correta e otimizada de torres de transmissão-recepção. Em engenharia civil pode ser útil o conhecimento dos perfis para tomadas de decisões em projetos de estradas, barragens, e outros.

### 3.5 Determinação da Intervisibilidade entre Pontos

Esta aplicação é um caso particular da extração de perfis. Neste caso o especialista está interessado em saber se entre duas posições quaisquer do terreno existem ou não barreiras de terreno. A solução deste problema é alcançada com a extração do perfil do terreno ao longo da linha poligonal reta que liga esses dois pontos.

### 3.6 Cálculos de projetos de engenharia

A utilização de MNE's tem aplicações importantes principalmente na área de engenharia civil. Nesta área, frequentemente, surge a necessidade de realizar modificações no terreno e cálculos sobre o terreno para projetos diversos como estradas, barragens, terraplanagens, etc... Os MNE's permitem aos especialistas a área simularem diversas situações sobre o terreno de tal forma a otimizar as decisões a respeito dos projetos aos quais estão envolvidos. Assim, por exemplo, o especialista pode simular a passagem de uma estrada por vários caminhos diferentes e para cada um deles: realizar cálculos, tais como áreas, volumes de aterro, etc...; analisar os perfis de cada estrada; analisar o mapa de declividades do terreno, etc... No caso do sistema de MNE's estar integrado a um Sistema de Informações Geográficas o especialista terá ainda

a oportunidade de combinar os resultados de MNE's com mapas ou imagens de satélite para obter outras informações tais como hidrovias, ocupação urbana e rural, etc...

### 3.7 Sombreamento sintético

A partir de um MNE de uma região e de um modelo matemático de sombreamento pré-estabelecido pode-se gerar MNT's sombreados e no formato imagem. Um MNT no formato imagem possui níveis de cota que variam de 0 a 255 e associa-se a esse MNT uma tabela que mapeia esses níveis aos valores de cota reais do terreno. Geralmente os modelos de sombreamento consideram além da normal em cada posição do terreno, a posição da(s) fonte(s) luminosa(s) que atuam sobre o terreno, e as características específicas dos materiais (como por exemplo índice de reflexão) que compõem os objetos do terreno.

O resultado do sombreamento sintético do MNT é uma imagem MNT com indicações das características topográficas do terreno. Estas imagens podem ser usadas como "background" de mapas cartográficos para fornecer ao leitor do mapa uma idéia do comportamento do relevo na região.

## 4. APLICAÇÕES DE MNE'S INTEGRADAS COM IMAGENS DIGITAIS

### 4.1 Correção geométrica de imagens de satélite

Na correção geométrica de imagens de satélites, obtidas a partir de visada lateral, devem ser considerados os efeitos das variações de altimetria da região coberta pela imagem. Esses efeitos também podem ter grande influência em distorções de imagens de alta resolução obtidas com visada vertical do satélite onde os desníveis de terreno são acentuados. Esses tipos de distorções, causados pelo desnível do terreno, podem ser corrigidos a partir de métodos de correção geométrica que consideram o MNE da região como parâmetro de correção.

### 4.2 Correção radiométrica de imagens de satélite

Assim como a geometria, a radiometria de uma imagem pode ser afetada pela posição de cada região do terreno, representada pelo "pixel", em relação a fonte principal, ou outras fontes, de iluminação do terreno. Isto é, pixels que representam porções iguais do terreno, por

exemplo, mesmo objeto na cena, podem ter respostas radiométricas diferentes numa imagem, pois o comportamento do relevo pode ser diferente nos locais representados por esses "pixel's".

Como na correção geométrica, os efeitos do relevo sobre a radiometria da imagem podem ser compensados desde que se tenha um MNE do local representado pela imagem. Essa compensação é muito importante para otimização de outros processamentos, que se queira realizar com uma imagem, como por exemplo a classificação de imagens multiespectrais. Neste caso utilizam-se metodologias que modelam o efeito de iluminação sobre o terreno partindo-se do conhecimento da declividade, de cada ponto representado na imagem, e das posições das fontes iluminadoras que atuam sobre o terreno.

### 4.3 Integração de MNT's e imagens em transformações IHS.

Em transformações do tipo IHS ("Intensity, Hue and Saturation"), podem-se utilizar imagens de satélite para representar os valores de intensidade, enquanto que o matiz pode corresponder ao MNT do local representado na imagem. Com esta combinação produz-se uma imagem cujas cores representam a altimetria do terreno e a intensidade de cada cor está associada a radiometria da imagem de entrada. Neste caso temos combinado, numa única imagem de saída, os efeitos de altimetria e radiometria relativos a região estudada. Esta imagem resultante pode servir também como "background" de mapas cartográficos.

### 4.4 Projeção planar do modelo com textura de imagem

Os MNE's podem, também, ser combinados com imagens de satélite em algoritmos de projeção perspectiva, ou paralela, que utilizam o método de "ray-tracing" para geração da projeção. Este método de projeção é muito caro computacionalmente, em termos de tempo de processamento, mais possibilita a visão tridimensional do terreno com alto grau de realismo. Neste caso o MNE do local a ser visualizado é usado para o cálculo da posição de cada ponto na projeção, enquanto que a imagem fornece a textura do terreno projetado. É comum nestes casos adicionar-se efeitos de fontes de iluminação sobre a imagem antes de gerar a projeção.

## 5. APLICAÇÕES IMPLEMENTADAS NO SGI-INPE

Ao Sistema de Informações Geográficas do INPE está integrado um Sistema de Modelagem Numérica de Terreno, MNT, que se propõe a fornecer ao SGI-INPE uma série de ferramentas de manipulação desse tipo de dados para serem combinados com outros tipos de informações como mapas temáticos e imagens de satélite.

Além da aquisição de amostras e geração de modelos, o SGI-INPE, já fornece ao usuário do sistema as seguintes aplicações:

- Projeções geométricas planares;
- Geração automática de mapas de contornos;
- Geração de mapa de declividades;
- Extração de perfis do terreno;
- Sombreamento sintético de imagens do modelo;
- Cálculo de volumes;
- Projeções planares com textura de imagem.

Algumas aplicações, que envolvem integração de MNT's com imagens de satélite podem ser obtidas diretamente a partir do uso das funções, já existente no SGI-INPE, de entrada de imagens e de combinação destas com outros tipos de informações, em particular com MNT's. Outras aplicações requerem um processamento parcial com as funções do SGI-INPE para produzir entradas para aplicações específicas de interesse do usuário.

## 6. CONCLUSOES

Apresentou-se um "overview" das possíveis aplicações relacionadas com Modelagem Numérica de Elevações. O presente trabalho não tem a pretensão de abordar todas as aplicações existentes. Mostrou-se aqui apenas as aplicações principais ou as mais usadas comercialmente nos sistemas de MNT's existentes.

A finalidade principal do trabalho é despertar no leitor a importância desse tipo de informação para os processamentos relativos ao estudo de fenômenos geocodificados isolados ou integrados com informações geográficas de outras naturezas tais como: gráficas, tabulares, ou imagens. É importante salientar, ainda, que o trabalho descreveu aplicações envolvidas exclusivamente com dados de natureza altimétrica, porém,

o sistema apresentado é capaz de representar e processar outros tipos de dados tais como: dados geofísicos e geoquímicos, dados meteorológicos (temperatura, velocidade de ventos, etc...), dados de batimetria, e outros.

O SIG do INPE oferece ao usuário desse sistema acesso a um conjunto de rotinas gráficas e às rotinas de gerenciamento da base de dados criada durante os processamentos diversos do sistema. Isto permite ao usuário desenvolver novos aplicativos específicos à sua área de interesse, que não estejam implementados ainda no sistema.

## BIBLIOGRAFIA

BARBOSA, O. C. Correção geométrica das imagens SPOT com uso de um modelo digital de elevação. Preliminar de Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1988.

CARLSON, I. Planar geometric projections and viewing transformations. *Computing Surveys*. 10(4):465-502, Dec. 1978.

DOYLE, F.J. Digital terrain models: An overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 44(2):1481-1485, Dec. 1978.

ERTHAL, G. J. et alli O Banco de dados geográficos do INPE. Anais do I Simpósio Brasileiro de Banco de Dados. PUC, Rio de Janeiro Abr. 1986.

FELGUEIRAS, C. A. Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1987.

PEUCKER, T. K. The impact of different mathematical approaches to contouring. *Cartográfica*. 17(2):73-95, 1980.

PETTINATI, F. Modelamento digital de terreno e representação gráfica de superfície. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1983.

DIAS, L.A.V. Relief effect correction on landsat imagery for forest applications using digital terrain models. Publicação INPE - 4611-PRE/1334. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Junho 1988.

YAMAMOTO, J. K. Representações gráficas espaciais em geologia com aplicações no complexo alcalino de Anitápolis. Dissertação de Mestrado no Instituto de Geociências da USP. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.