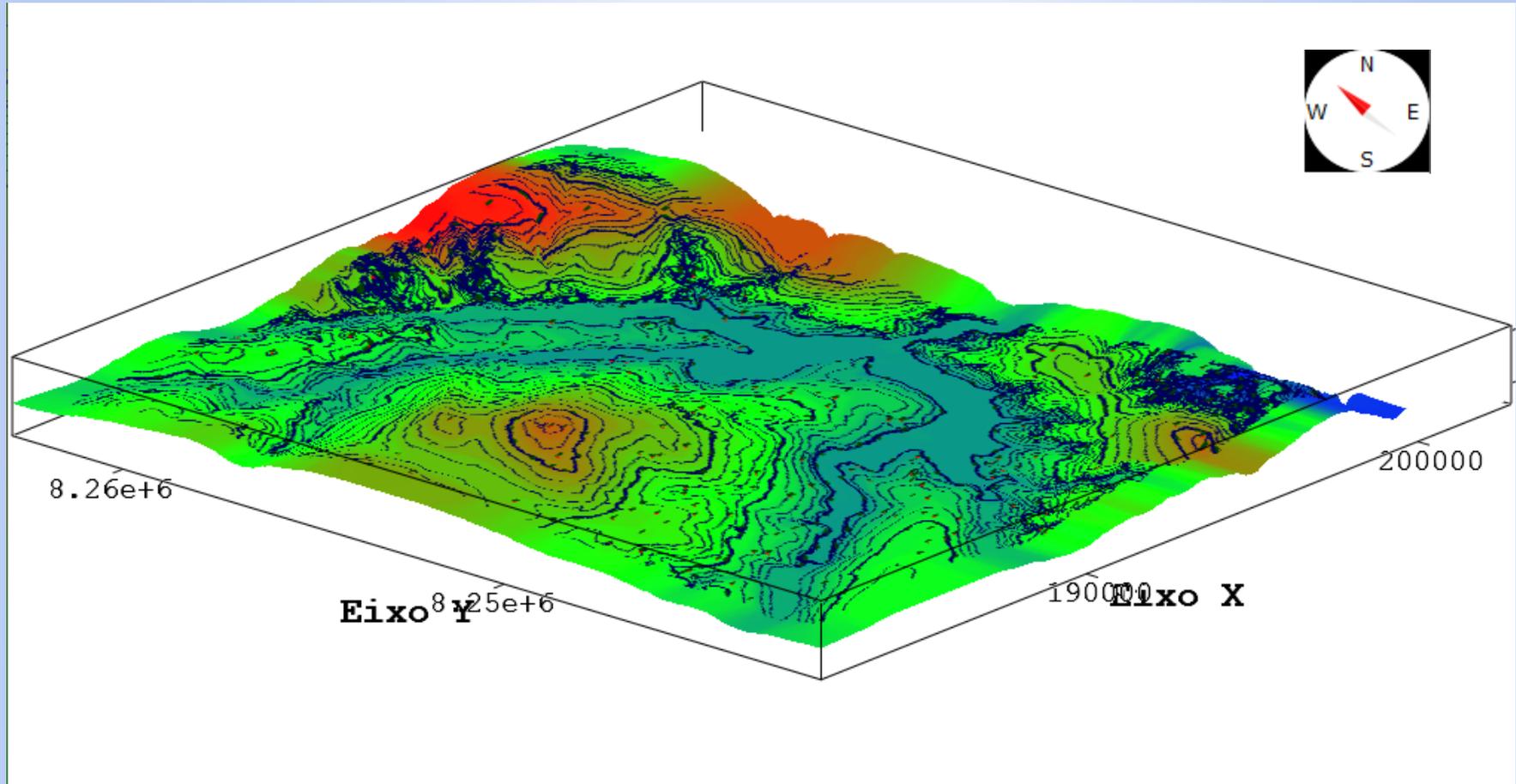


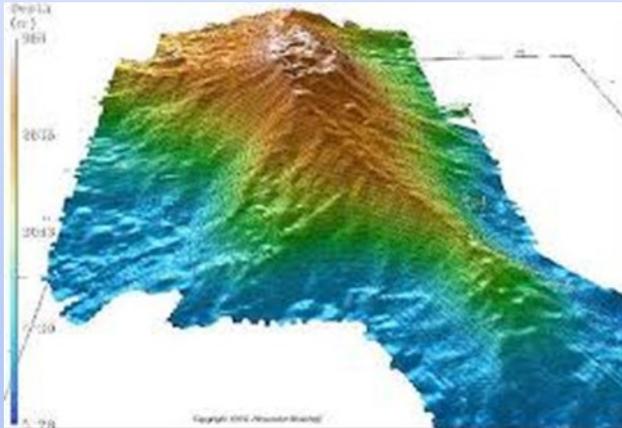
# MODELAGEM NUMÉRICA DE TERRENO



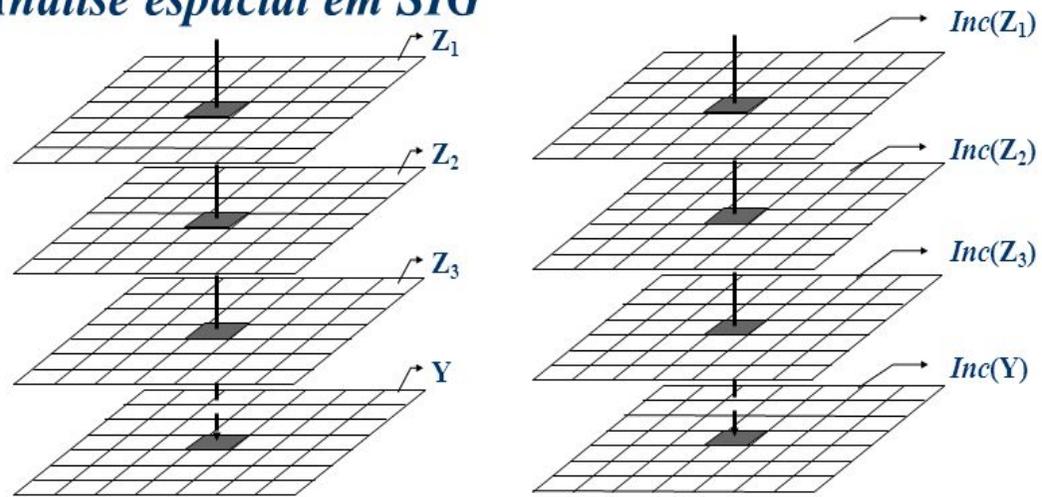
*Carlos A Felgueiras*

# MOTIVAÇÃO

## MODELAGEM NUMÉRICA DE TERRENO



### • *Análise espacial em SIG*



Modelagem Espacial:  $Y(\mathbf{u}) = g(Z_1(\mathbf{u}), \dots, Z_n(\mathbf{u}))$  para  $n$  entradas

As incertezas  $Inc(Z_i)$  se propagam para a saída  $Inc(Y)$

Exemplo:

$Z_1$  = Tipo de Solo, Vegetação, ... (Temático)

$Z_2$  = Áreas de Preservação (Imagem Classificada)

$Z_3$  = Pluviosidade, Temperatura, Declividade... (MNT)

$Y$  = Aptidão Agrícola

$Inc$  = Qualifica local/e os dados (mapas)

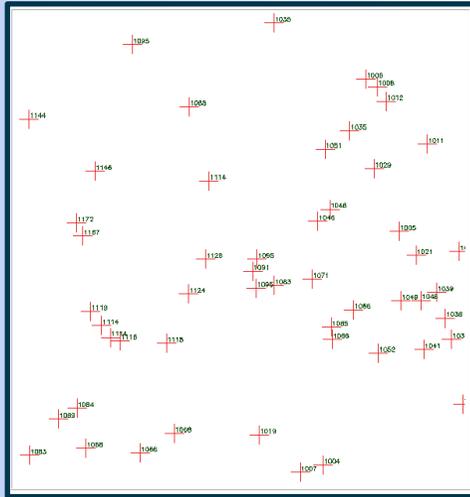
# Modelo Numérico de Terreno

- Definição
  - Um MNT descreve a variação espacial contínua de uma grandeza sobre uma região. Exemplos: Temperatura, velocidade de vento, precipitação, teor geoquímico ou geofísico, altimetria,....
- Dados de entrada - Amostras
  - arquivos pontuais  $(x,y,z)$  ou isolinhas  $( \{ (x,y) \}, z )$
  - $(x,y)$  posição espacial 2D e  $z$  é o valor do atributo
- Geração de distribuição contínua
  - problema de interpolação
- Tipos de Interpoladores
  - não-paramétricos (média móvel local)
  - ajuste global de superfície
  - triangulação
  - *geo-estatística (krigeagem)*

# Modelo Numérico de Terreno

## Estruturas de Representação Computacional:

Pontual

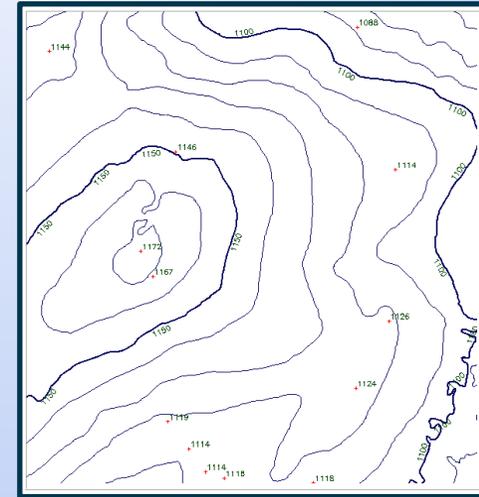


Isolinhas

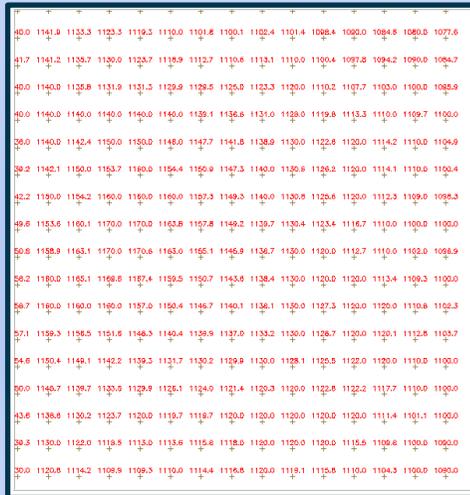
Isolinhas

+

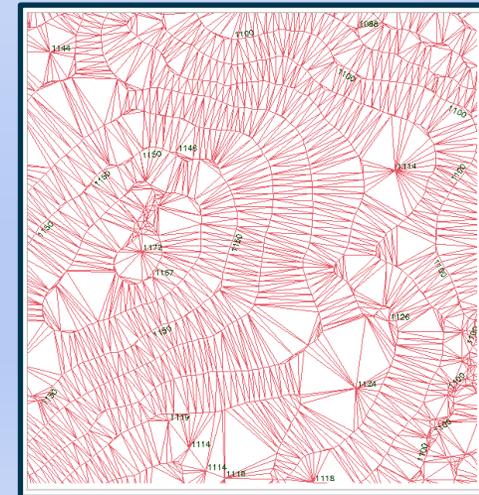
Pontos



Grade Retangular  
(Matricial)

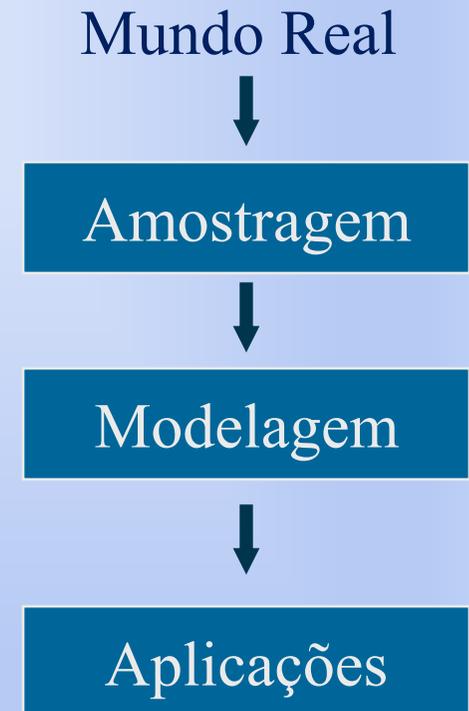


Grade Triangular  
(TIN)



# Modelo Numérico de Terreno

- O processo de Modelagem Numérica
  - Amostragem: dados de entrada nas representações
    - pontos 3D
    - isolinhas
    - linhas de restrição (características)
  - Modelagem propriamente dita: criação de estruturas
    - de grades regulares
    - de grades irregulares
  - Aplicações ou análises: uso dos modelos
    - projeção planar, imagens, declividade
    - fatiamento, visibilidade, contornos,
    - volumes, drenagens, etc...

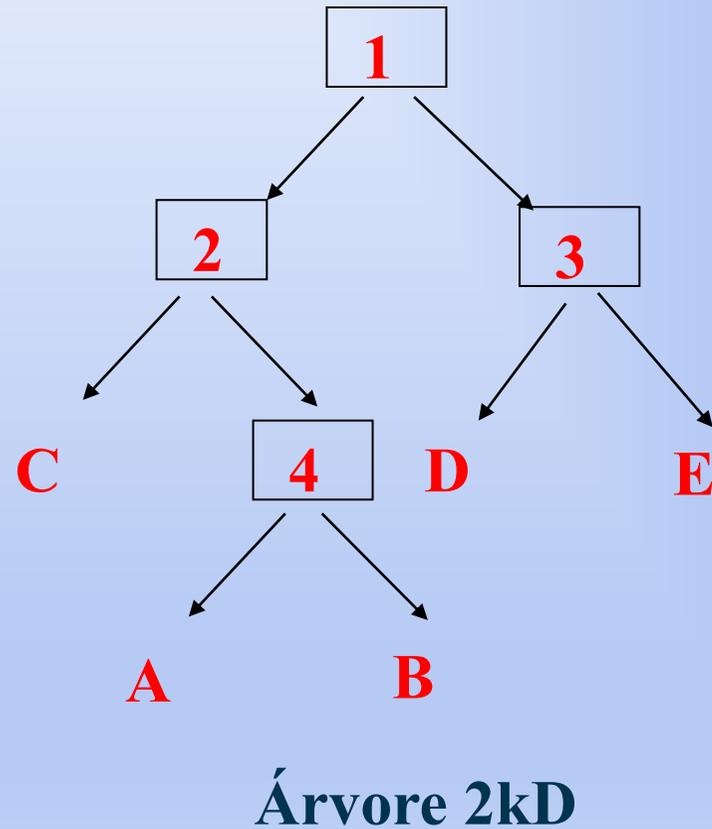
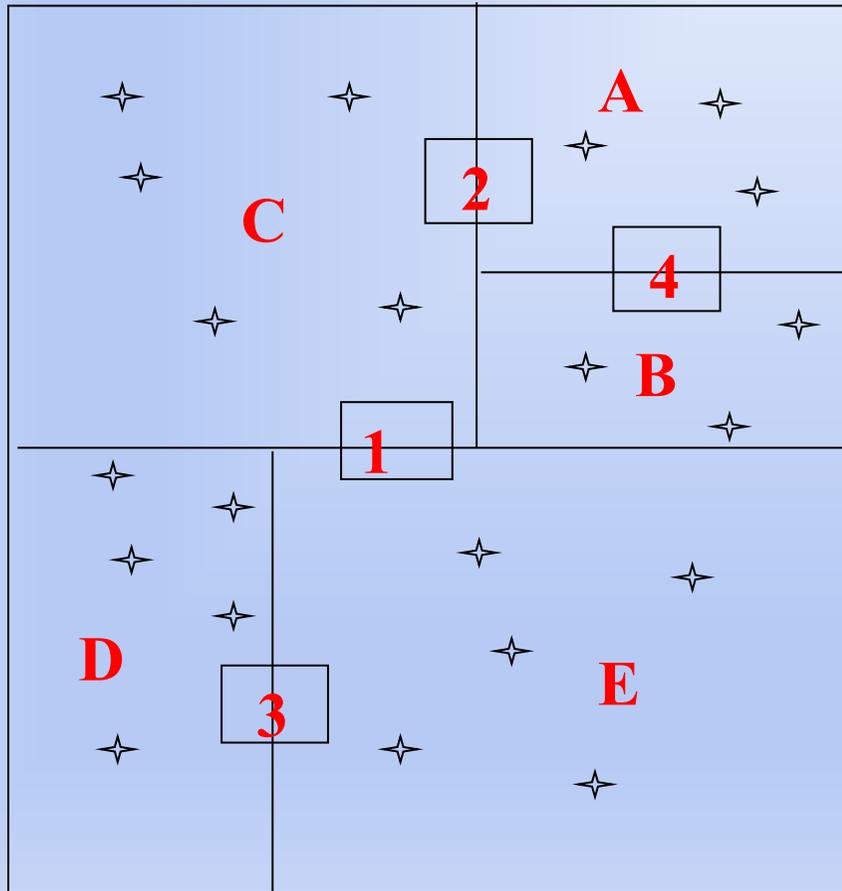


# Entrada e Edição (Amostragem)

- Fontes de amostras:
  - Bases topográficas, Levantamentos em campo, GPS's, Importação de outros sistemas (formatos DXF, Generate, etc..)
- Classificação quanto a distribuição:
  - Espaçamento regular (grade retangular – SRTM, GDEM,...)
  - Espaçamento não regular (amostras esparsas)
- Redução das amostras: Problemas de super-amostragem (generalização)
- Organização das amostras: Otimização para buscas de vizinhos
- Definição da vizinhança: Raio de influência e # de vizinhos + próximos (dependência espacial)

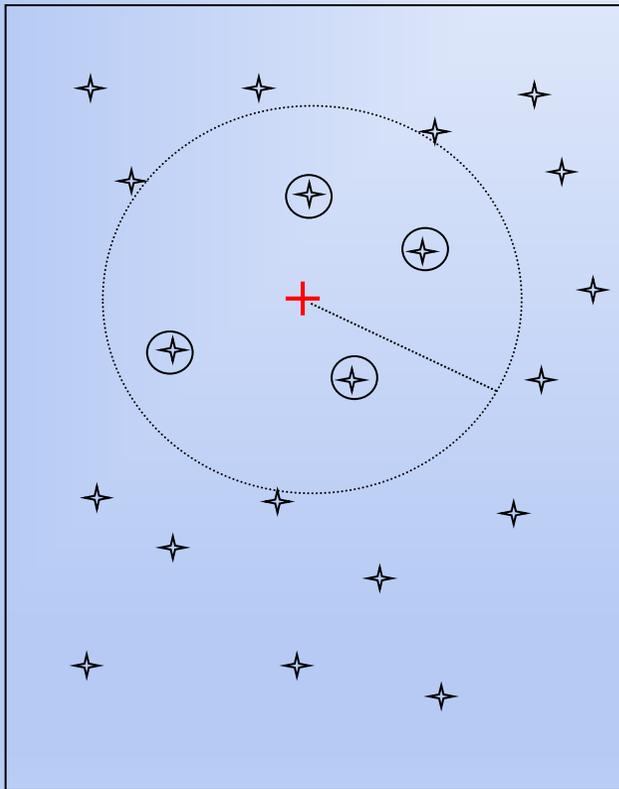
# Entrada e Edição (Organização das amostras)

## Partição do espaço

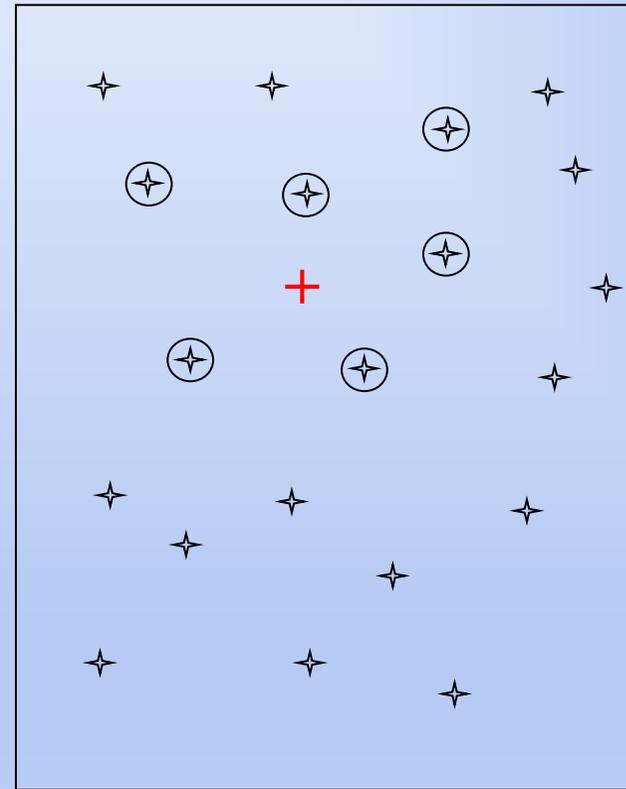


# Entrada e Edição (Definição da vizinhança)

## Raio de influência



## Número de vizinhos



⊙ Ponto da grade

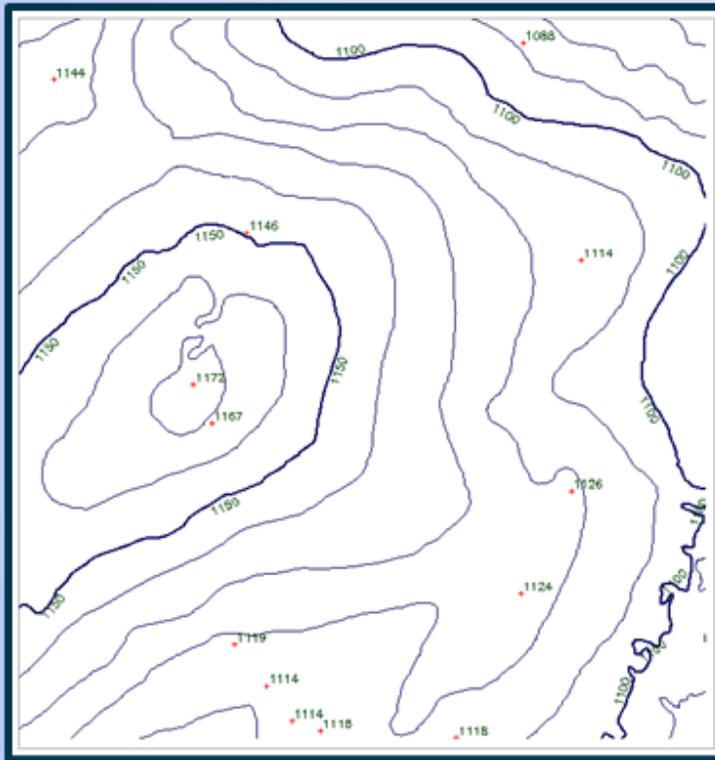
✦ Ponto amostral

⊕ Amostras vizinhas

# Entrada e Edição

## Amostras

### Pontos 3D e Isolinhas



**Line Checking** [min] [max] [close]

Z Value:	<input type="text" value="1070.00"/>	<input type="button" value="Change"/>
Demand:	<input type="text" value="invalido"/>	<input type="button" value="Change"/>
Positive Imp.:	<input type="text" value="invalido"/>	<input type="button" value="Change"/>
Negative Imp.:	<input type="text" value="invalido"/>	<input type="button" value="Change"/>

Line Type

Breakline       Isoline

Linha corrente: 217

**Points** [min] [max] [close]

Z Value:	<input type="text" value="1032.00"/>
Demand:	<input type="text" value="invalido"/>
Impedance:	<input type="text" value="invalido"/>

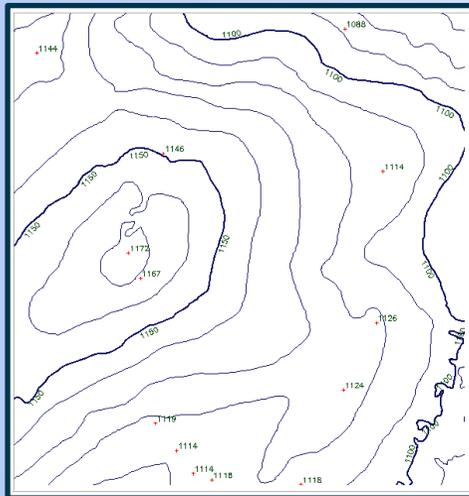
      

Ponto 3D corrente: 169

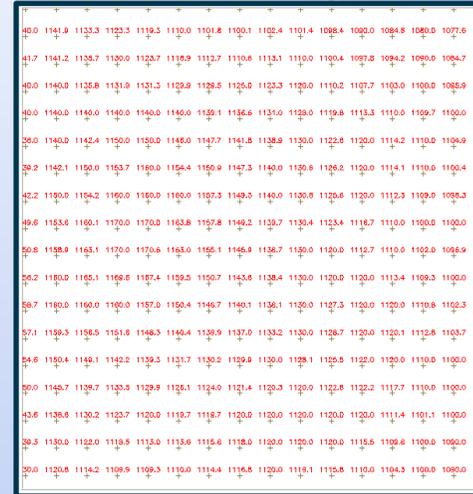
# Modelagem Numérica por Grades

Amostras

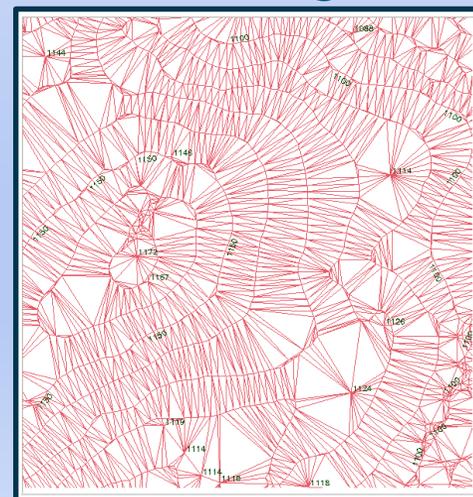
Pontos 3D e Isolinhas



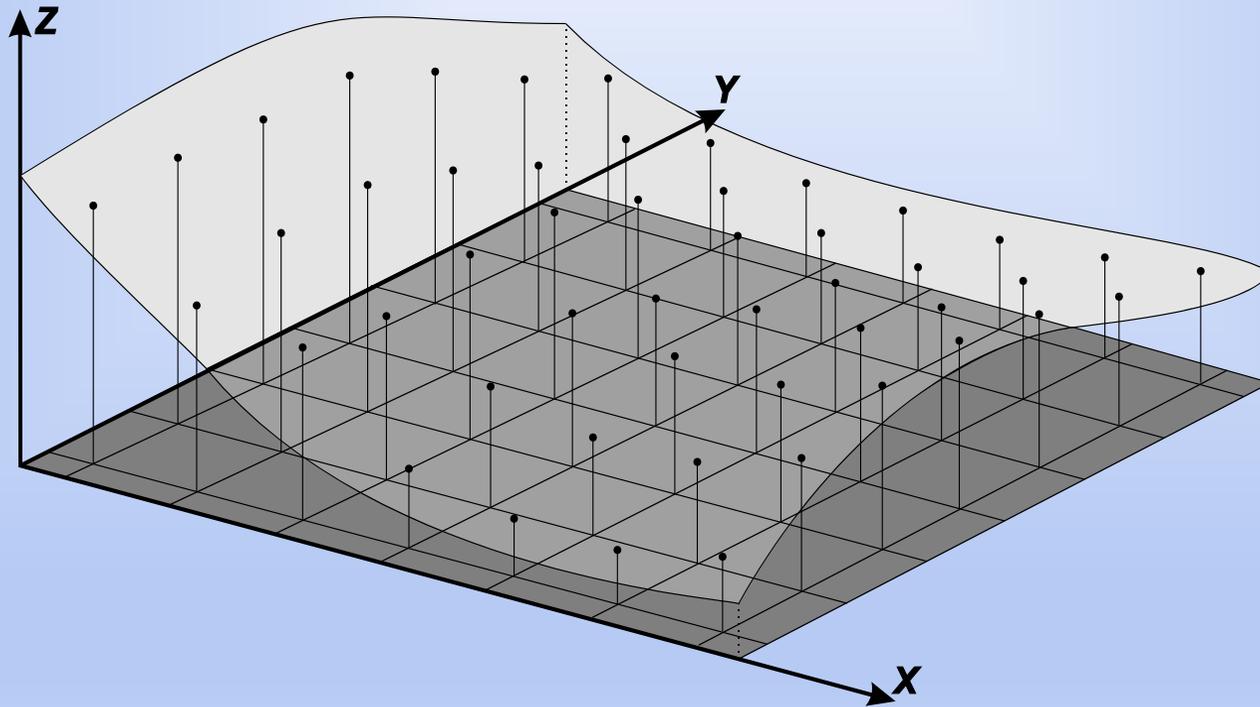
Grade retangular



Grade triangular



# Modelagem por Grade Regular

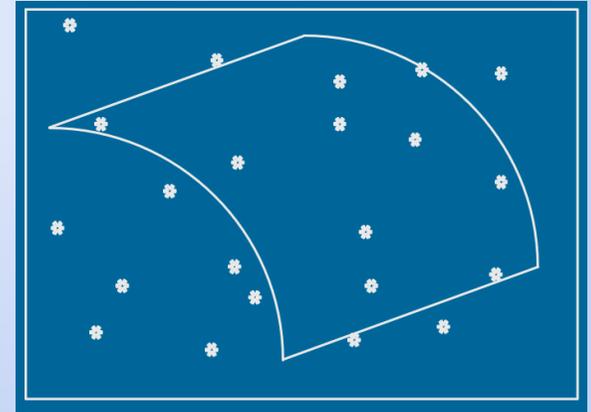


# Modelagem por Grade Regular (Interpolação Espacial)

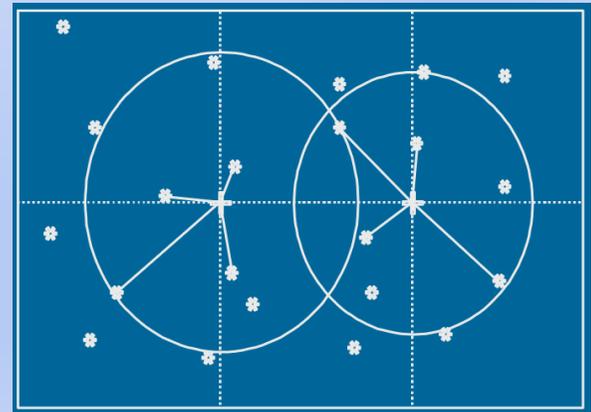
- Interpolação Espacial
  - processo de estimar grandezas a partir de amostras na área de estudo
  - (usualmente) grandeza deve ser quantizada
- Lei de Tobler para SIG
  - pontos vizinhos no espaço tem valores mais correlacionados que pontos distantes

# Modelagem por Grade Regular (Interpoladores: global x local)

- Interpoladores globais
  - função única mapeada em toda a área
  - mudança em um valor afeta todo o modelo
  - usado quando se conhece a forma da superfície (análise de tendência)



- Interpoladores locais
  - algoritmos aplicados localmente
  - mudanças em um valor tem efeitos dentro da janela de interpolação

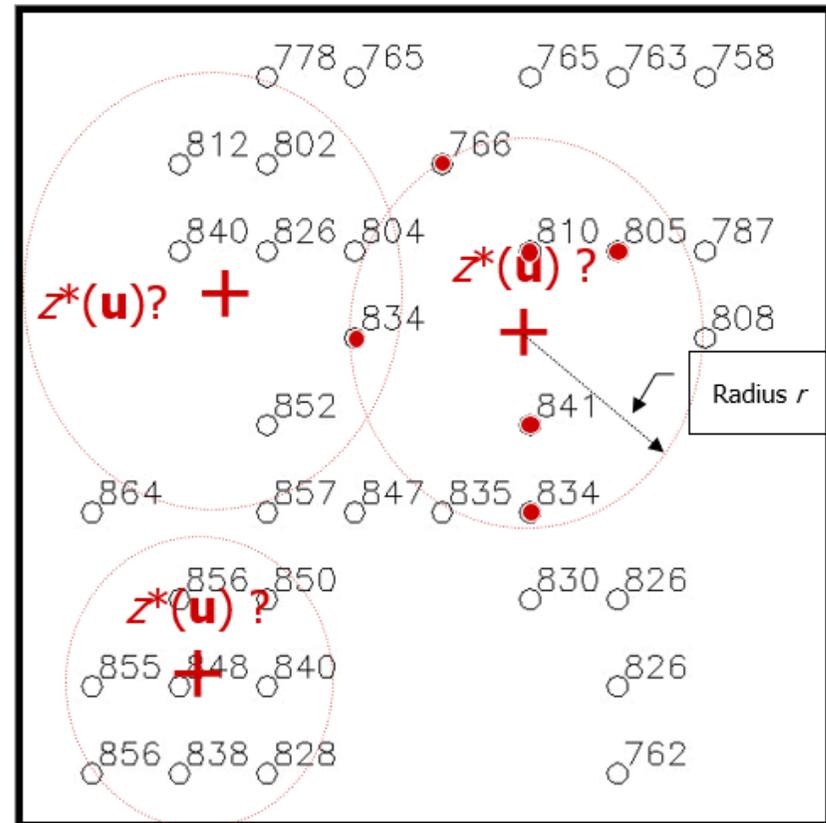


# Modelagem por Grade Regular: Interpoladores Locais

## Local Estimators

- Use local neighborhood to determine the closer local samples to be taken into account in the interpolation.
- Polynomials are applied locally, using only the closer samples.
- Problems with continuity must be considered.
- Criteria for neighborhood definition
  - Number of closer samples? How many?
  - Distance from the location to be interpolated? How far?
  - What is better?

○ sample locations + estimation locations



Closer samples for local estimation

7

Ver mais detalhes no arquivo:

04. MSGT-Predictions with Deterministic Procedures.pdf

# Geração de Grade Retangular (Interpolador de Média Local)

- **Rectangular Grids with Local Mean Interpolators**

- General equation for estimating each grid point at location  $\mathbf{u}$  ( $x_{\mathbf{u}}, y_{\mathbf{u}}$ )

$$z_{\mathbf{u}}^* = \frac{\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha\mathbf{u}} z_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha\mathbf{u}}}$$

$\mathbf{u}$  is the spatial location of  $z^*$

$n$  is the number of samples inside  $r$

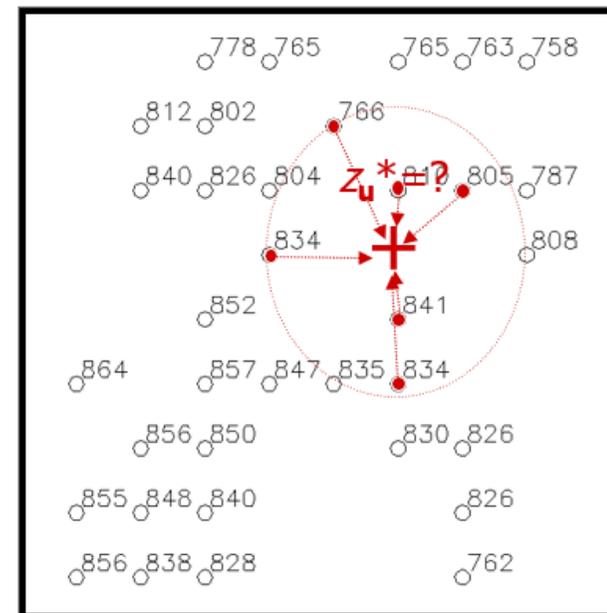
$w_{\alpha\mathbf{u}}$  is the weight of sample  $\alpha$  at location  $\mathbf{u}$

## Interpolators:

- **Nearest Neighbor** when  $n = 1$
- **Simple Means** when  $w_{\alpha\mathbf{u}} = 1$

○ sample locations

+ estimation locations



Closer samples for estimation a  $z^*$  value at a grid location

# Geração de Grade Retangular (Interpolador de Média Local)

- **Rectangular Grids with Local Mean Interpolators**

- General equation for estimating each grid point at location  $\mathbf{u}$

$$Z_{\mathbf{u}}^* = \frac{\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha\mathbf{u}} Z_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha\mathbf{u}}}$$

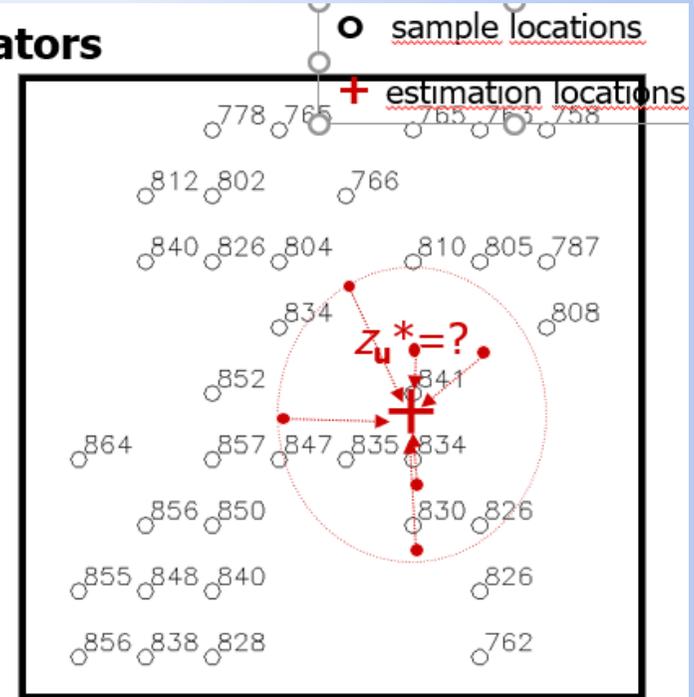
$w_{\alpha\mathbf{u}}$  is the weight of sample  $\alpha$  at location  $\mathbf{u}$

**Interpolators:**

- **IDW – Inverse Distance Weighted** when
- **IDW Optimized (Quadrants)**

$d_{\alpha\mathbf{u}}$  is the Euclidean distance between sample  $\alpha$  and location  $\mathbf{u}$

$k$  is the power of the distance  $d_{\alpha\mathbf{u}}$



$$w_{\alpha\mathbf{u}} = \frac{1}{d_{\alpha\mathbf{u}}^k}$$

$$d_{\alpha\mathbf{u}} = \sqrt{(x_{\alpha} - x_{\mathbf{u}})^2 + (y_{\alpha} - y_{\mathbf{u}})^2}$$

# Geração de Grade Retangular (Interpolador de Média Local)

## • Rectangular Grids with Local Mean Interpolators

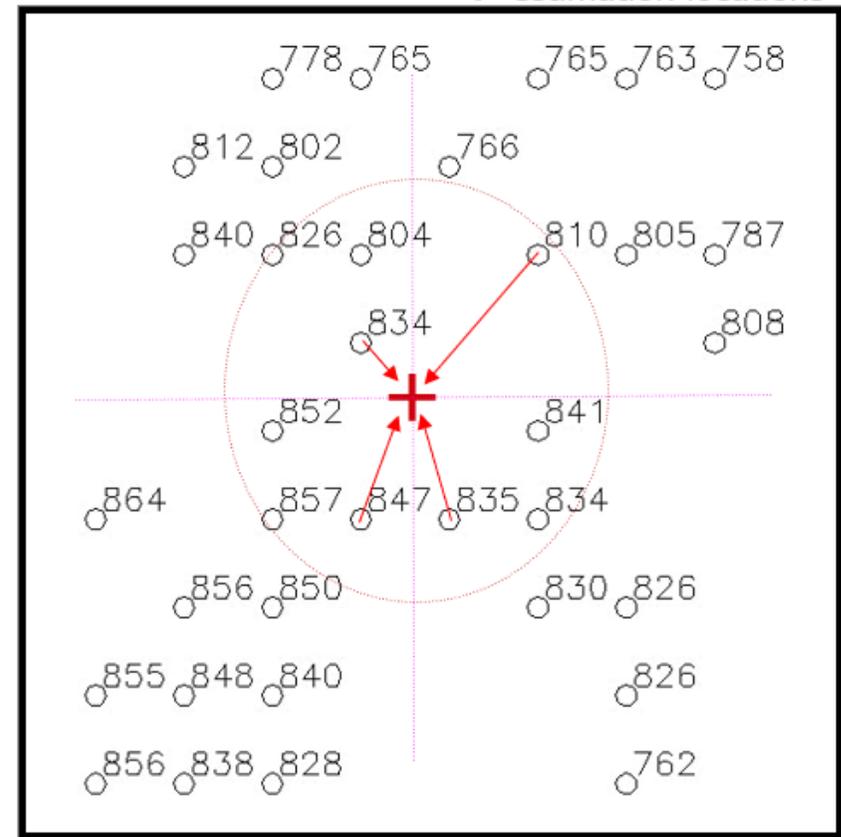
### IDW Optimized (Quadrants)

- The space is split in 4 quadrants relative to the interpolation location.
- Only 1 (or 2, ..., or  $n$ ) closer sample(s) of each quadrant is considered for the interpolation.
- This optimization avoid using clustered samples
- Some authors suggest split the space in octants (or more ants).

**Important:** The  $z$  variation inside each rectangle of a rectangular grid can be modelled by bilinear, bicubic or other patch function.

○ sample locations

+ estimation locations

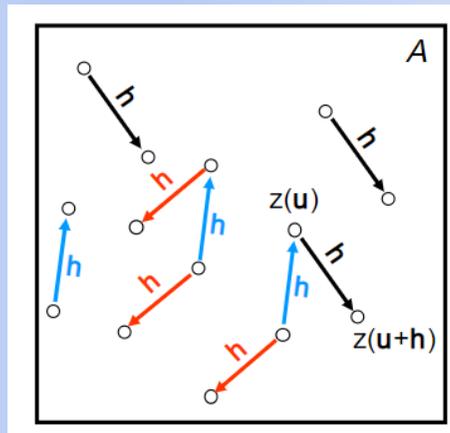


IDW considering quadrant locations

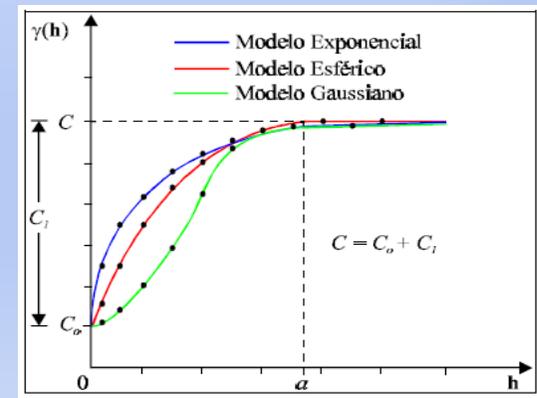
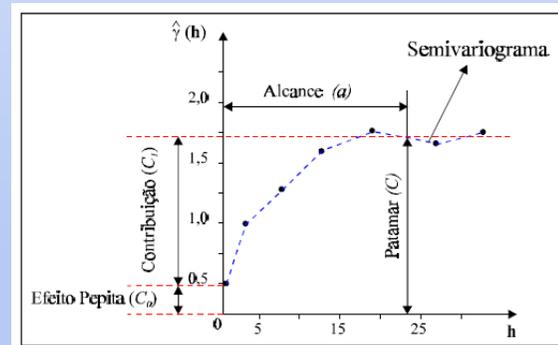
# Modelagem por Grade Regular: Interpoladores Locais

Definição do raio de influência: **Variograma**

- Representa variabilidade do atributo em função da distância. Medida de dependência espacial (resíduos = dado - tendência)

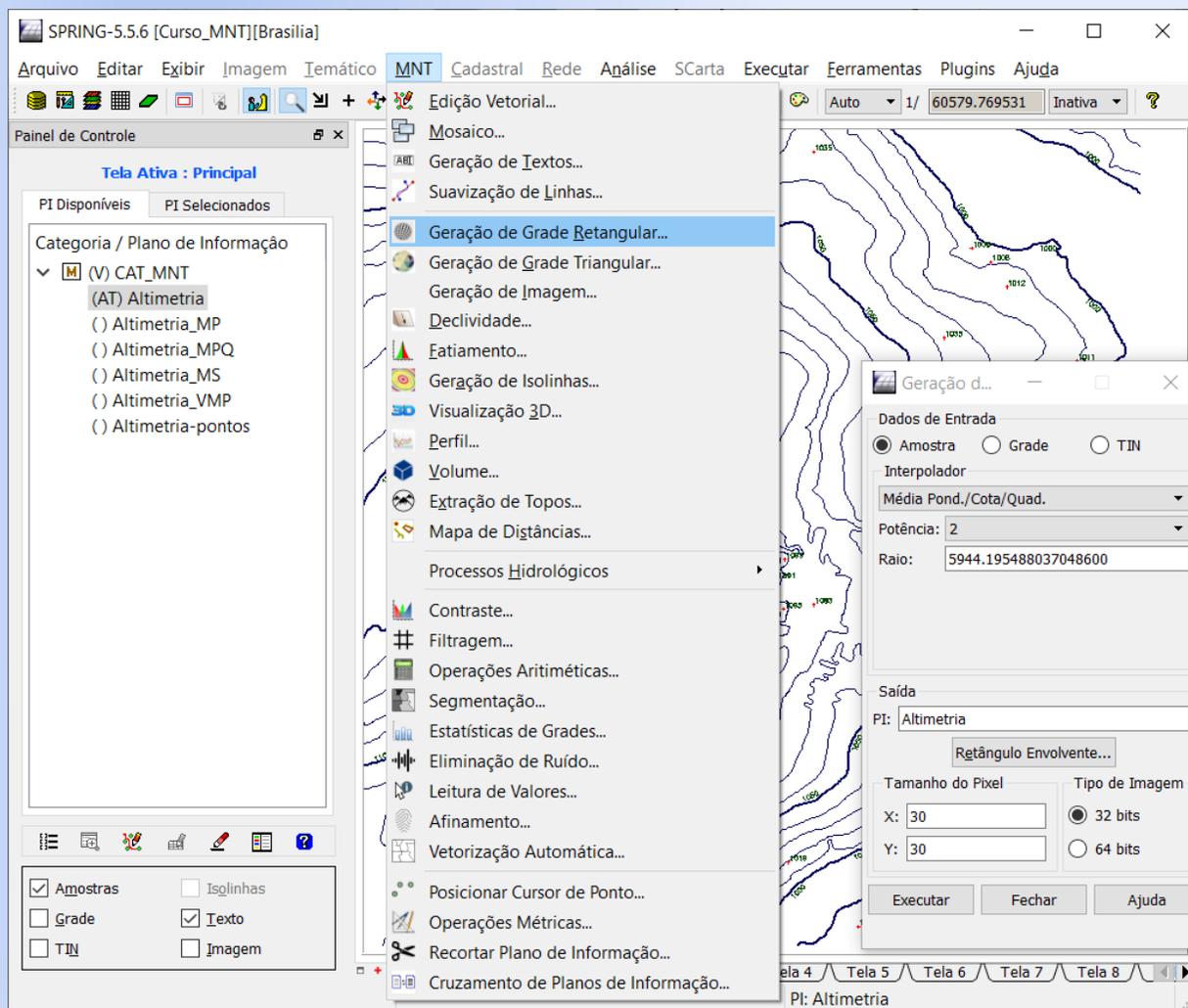


$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{\beta=1}^{n(h)} \{Z(x_{\beta}, y_{\beta}) - Z((x_{\beta}, y_{\beta}) + h)\}^2$$

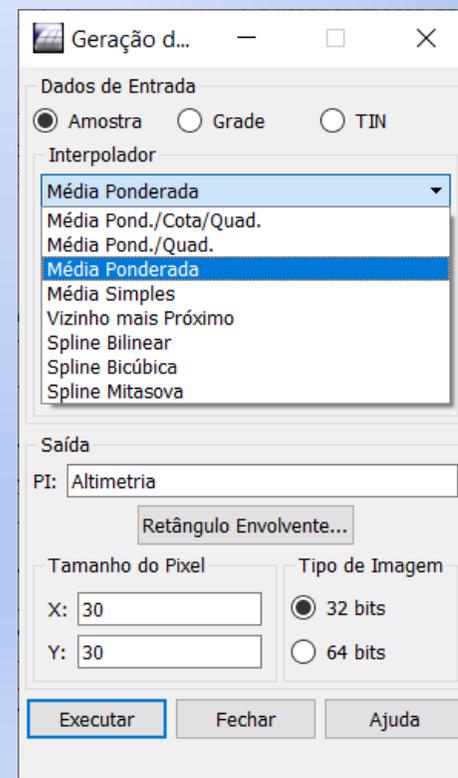


<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/curso/PyESSDAES-v11-1.zip>

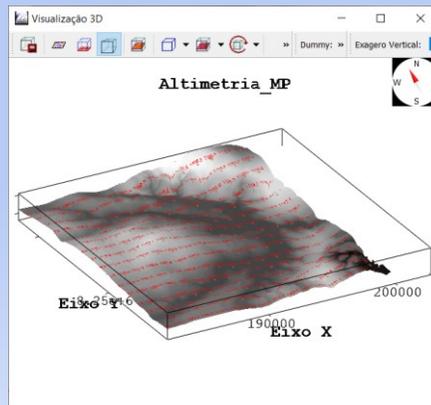
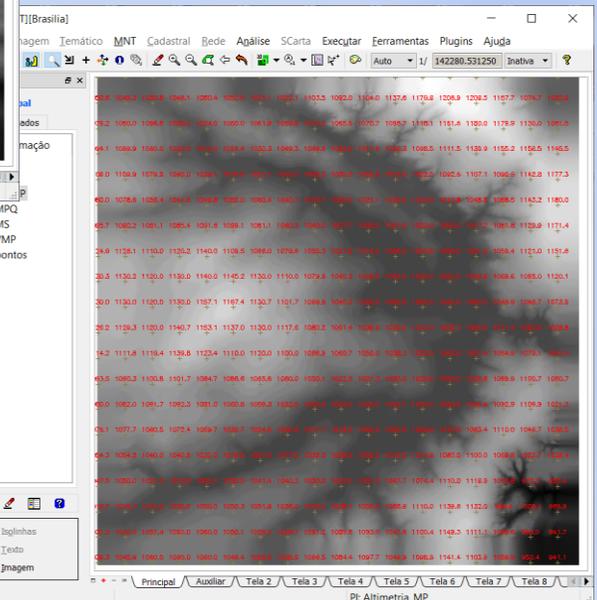
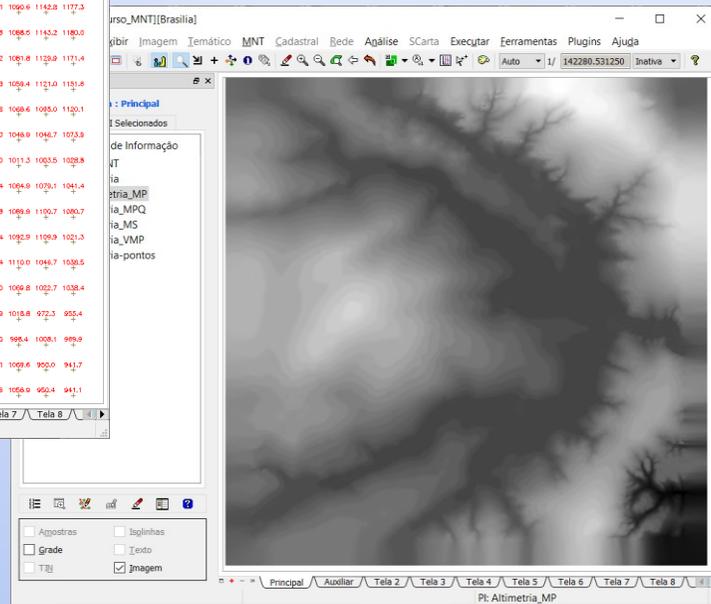
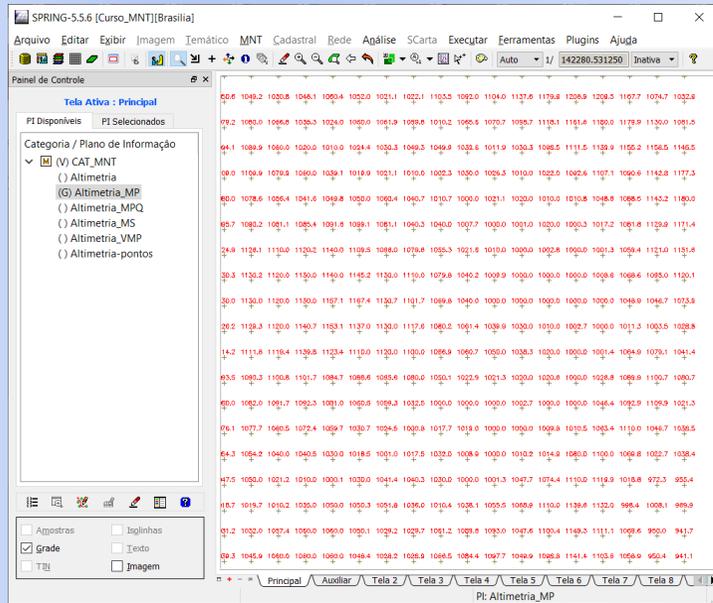
# Geração de Grade Retangular (SPRING – Médias locais e patches)



## Interpoladores para amostras pontuais e isolinhas

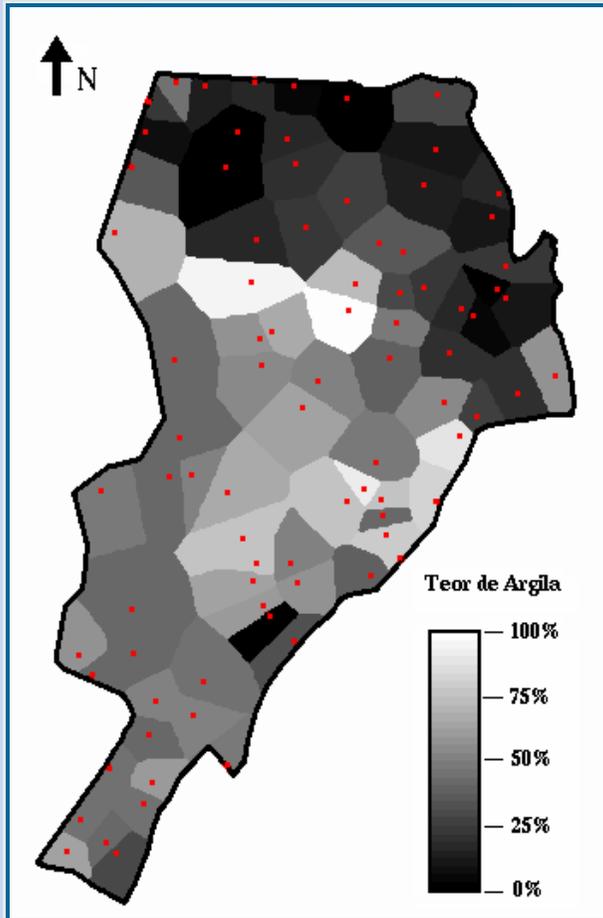


# Modelagem por Grade Retangular (Representação Matricial)

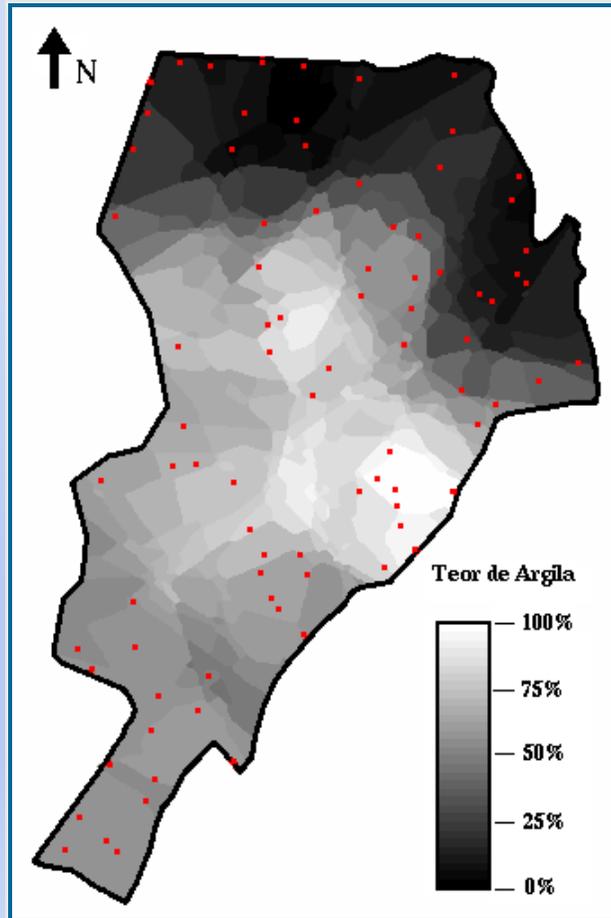


# Modelagem por Grade Retangular (interpoladores)

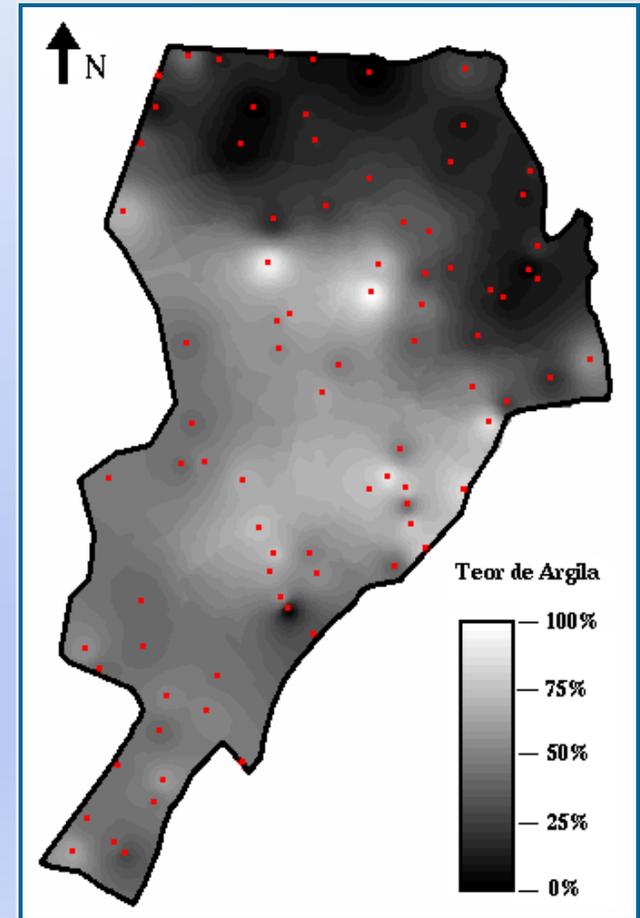
## Vizinho mais próximo



## Média Simples



## Média Ponderada



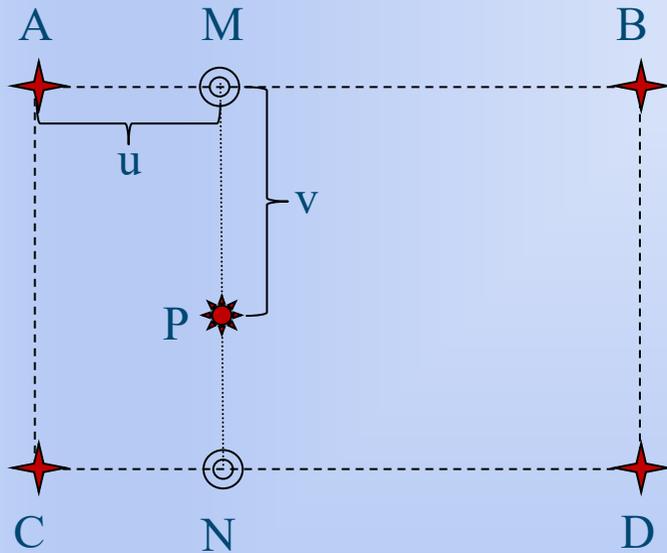
# Modelagem por Grade Retangular (Visualização com LUT)

The screenshot displays the SPRING-5.5.6 software interface. The main window shows a terrain map with a color gradient from blue to red. A dialog box titled "Remapeamento de Cores" is open, allowing for color remapping. The dialog box contains the following elements:

- Minimum value: 920.041
- Maximum value: 1220
- A color gradient bar from blue to red.
- Buttons: Executar, Aplicar, Fechar, Ajuda.

The software interface includes a menu bar (Arquivo, Editar, Exibir, Imagem, Temático, MNT, Cadastral, Rede, Análise, SCarta, Executar, Ferramentas, Plugins, Ajuda) and a toolbar. The left panel shows a tree view of layers under "PI Disponíveis" and "PI Selecionados". The bottom status bar displays coordinates (X: 197510.5771, Y: 8262665.5648) and the current layer name (PI: Altimetria\_MP).

# Modelagem por Grade Retangular (Grade de Grade)



$$z_M = (1-u)z_A + (u)z_B$$

$$z_N = (1-u)z_C + (u)z_D$$



$$z_P = (1-v)z_M + (v)z_N$$

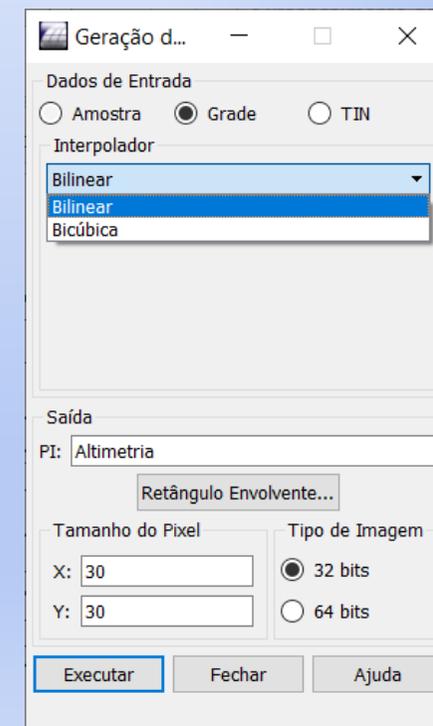
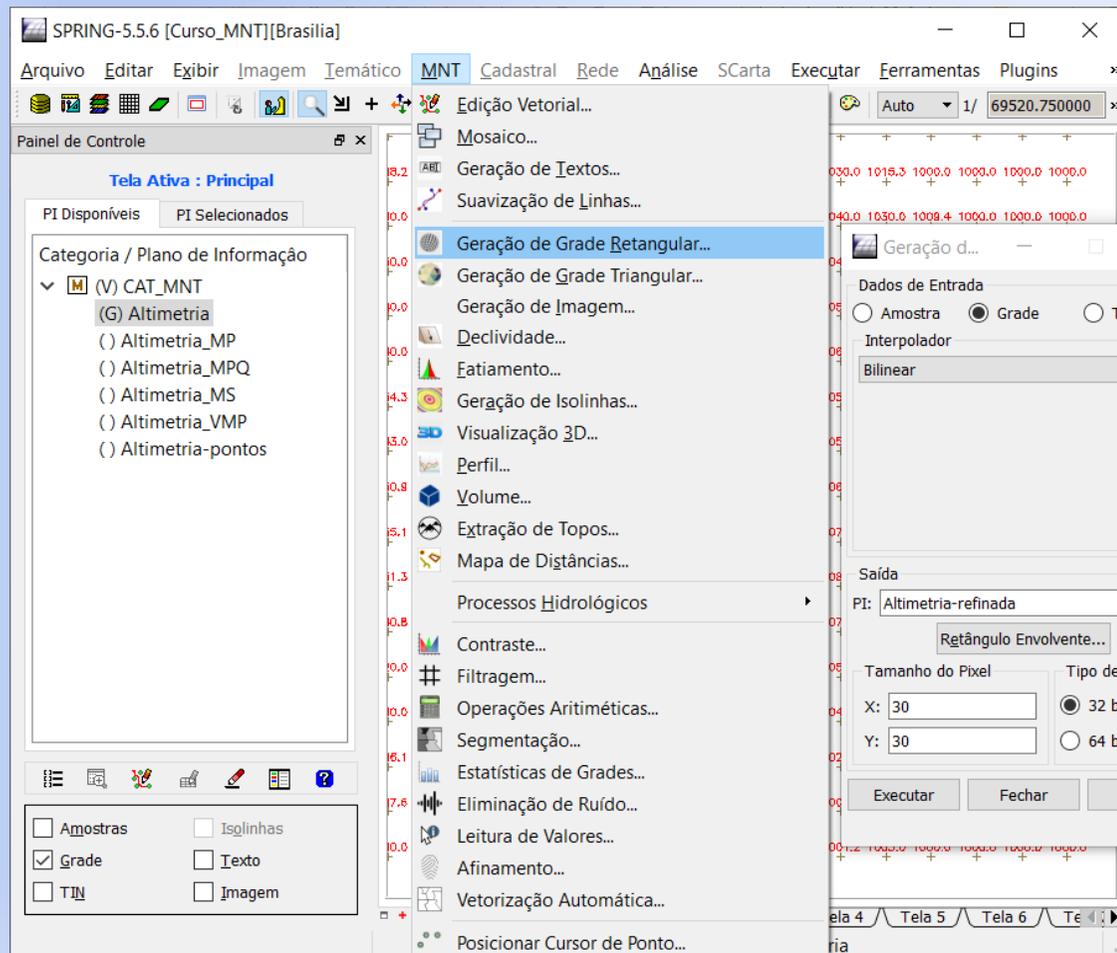
$$u, v \in [0,1]$$

**Modelagem bilinear : 4 vizinhos**

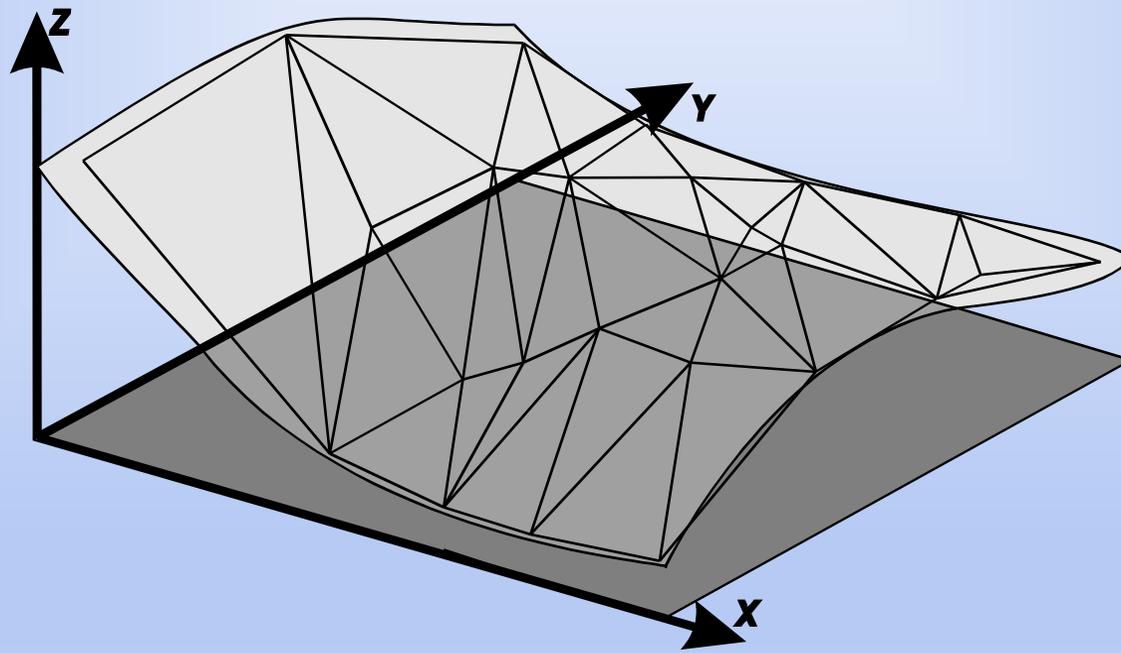
**Modelagem bicúbico : 25 vizinhos**

# Geração de Grade Retangular (SPRING – Grade de grade)

## Interpoladores para Grades alterar Resolução e Retângulo Envolvente

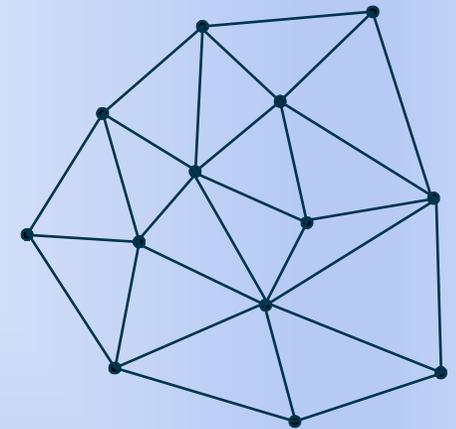


# Modelagem por Grade Triangular



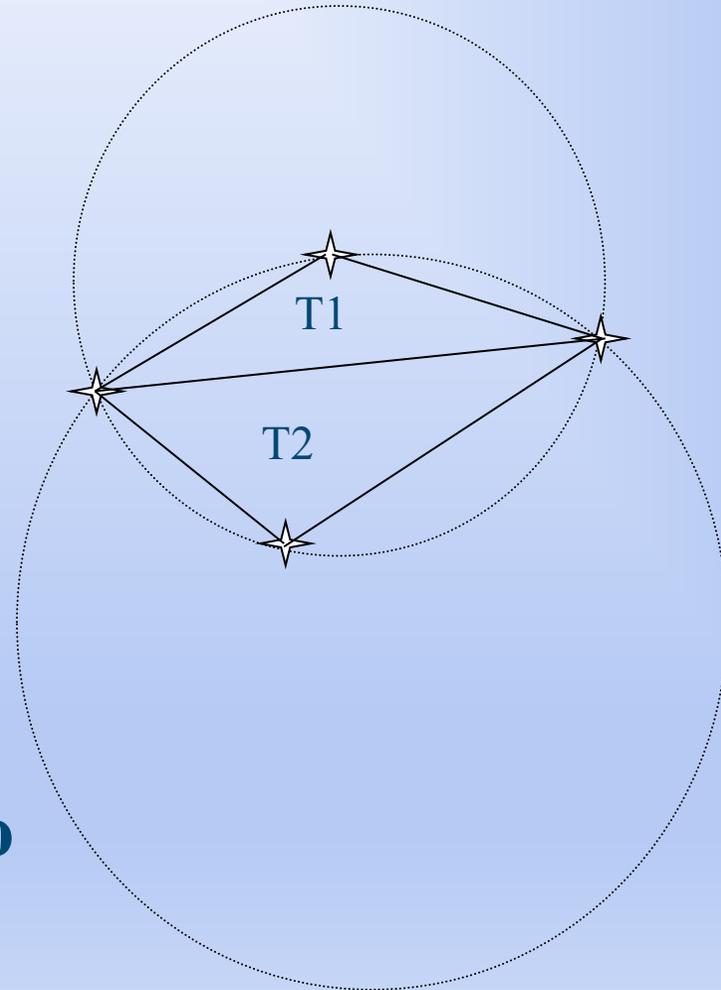
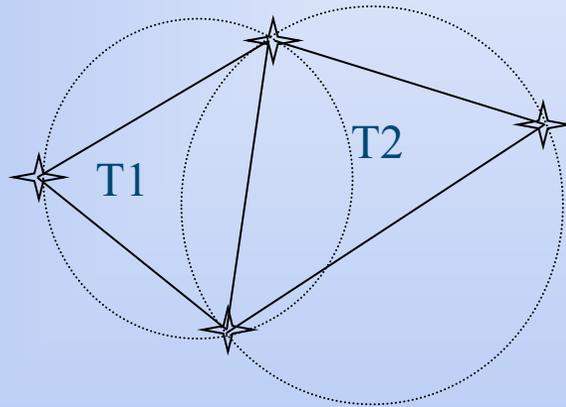
# Modelagem por Grade Triangular: Conceitos

- Superfície definida por um poliedro
  - faces triangulares
  - vértices = pontos amostrados
  - triangulação não é única.



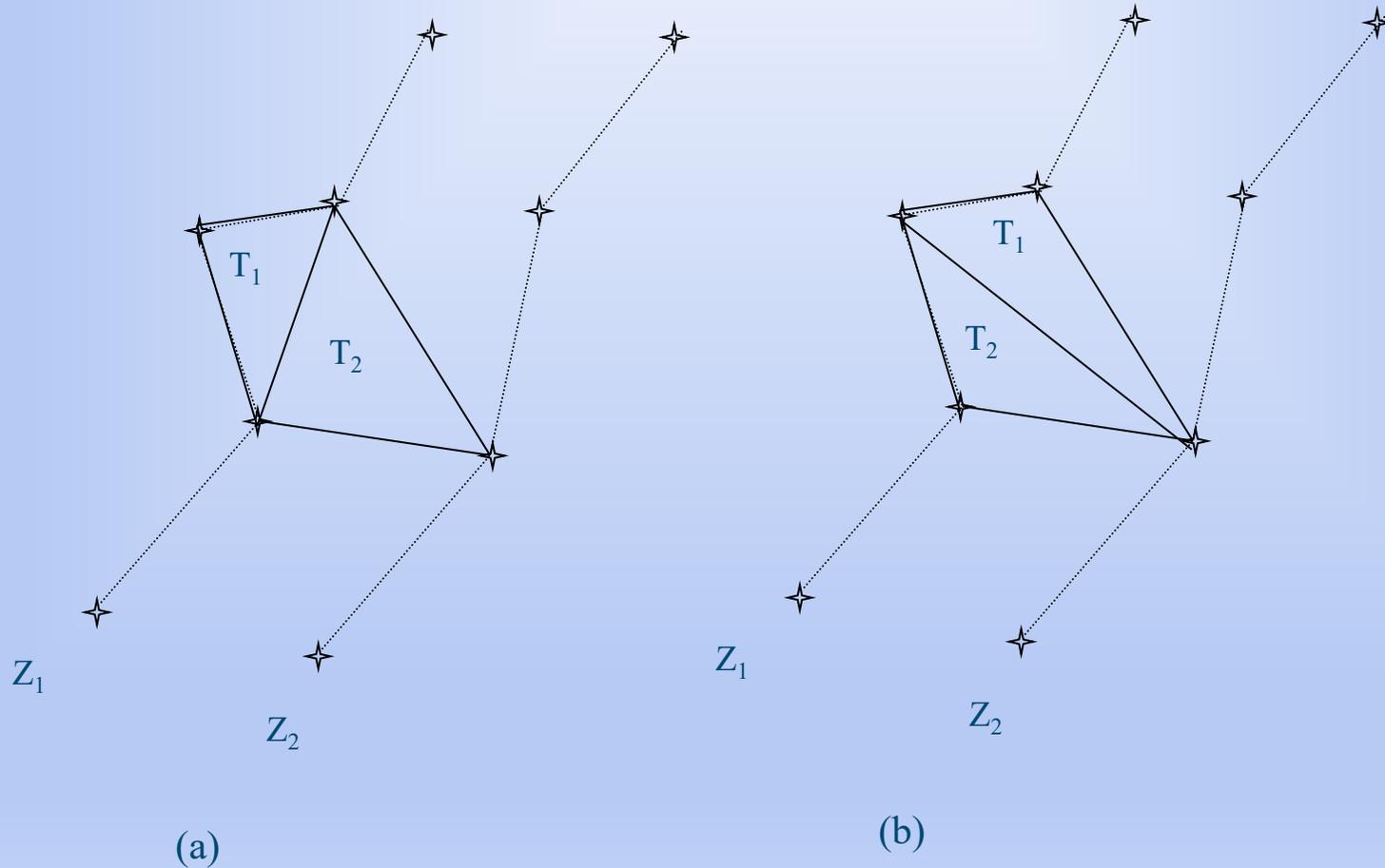
- Triangulação de Delaunay- Critério do Circumcirculo
  - “Dados os pontos  $p_a, p_b$  e  $p_c \in$  Conjunto Amostral  $P$  onde  $a \neq b \neq c$ , uma triângulação  $T$  é dita ser de Delaunay sse  $\forall t \in T$ , com vértices nos pontos  $p_a, p_b$  e  $p_c$ , o circumcirculo que passa pelos vértices de  $t$  não contém nenhum outro ponto  $p_d \in P / d \neq a \neq b \neq c$ ”.

# Modelagem por Grade Triangular: Triangulação de Delaunay

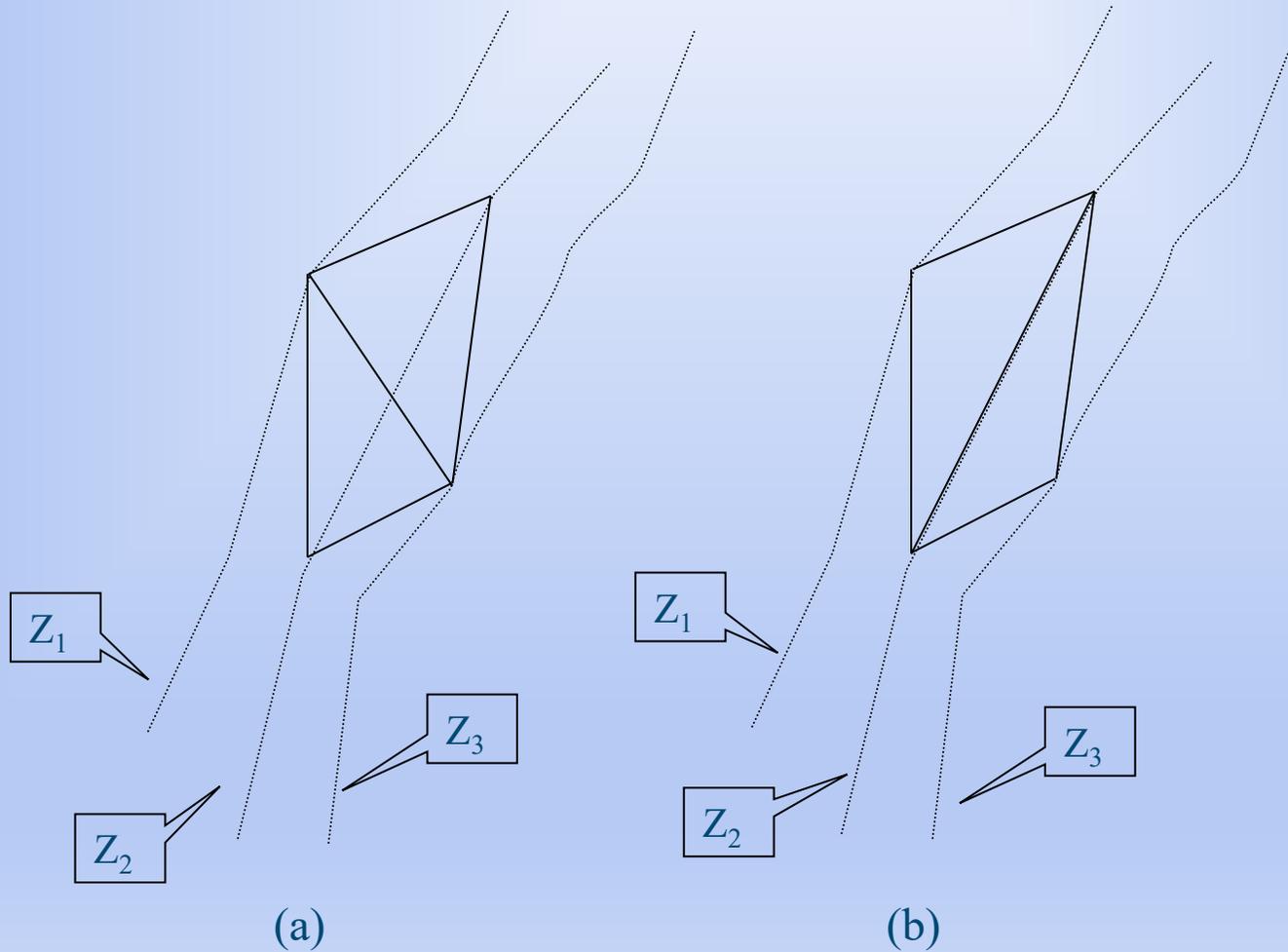


**Critério do Circumcículo  
para definição da triangulação  
de Delaunay.**

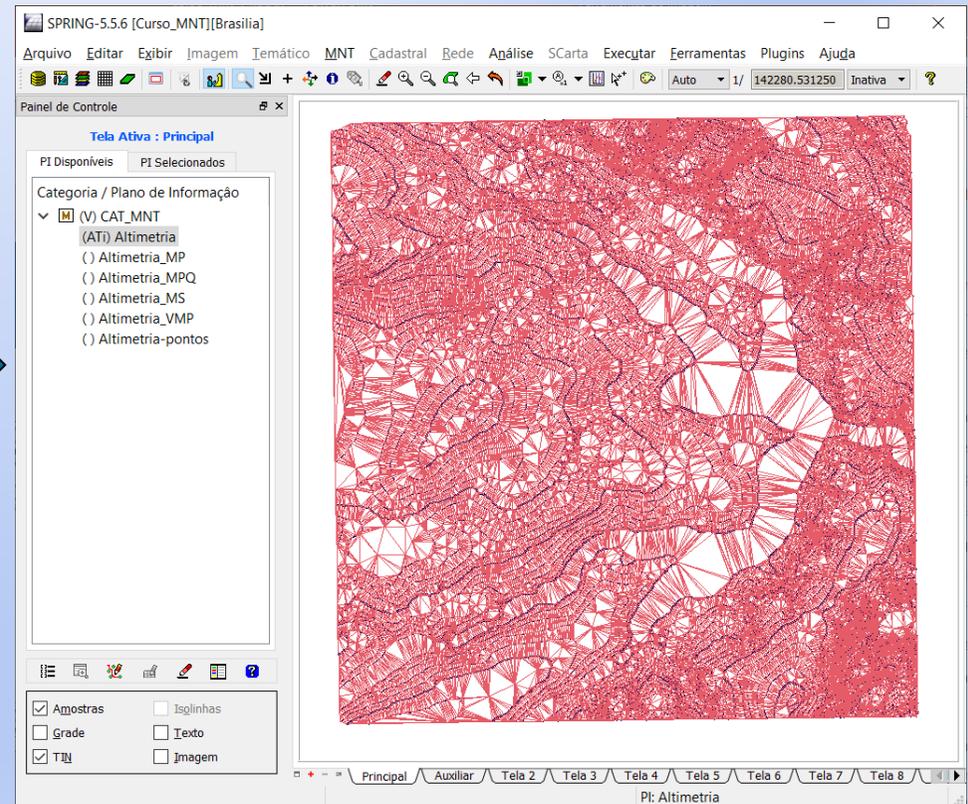
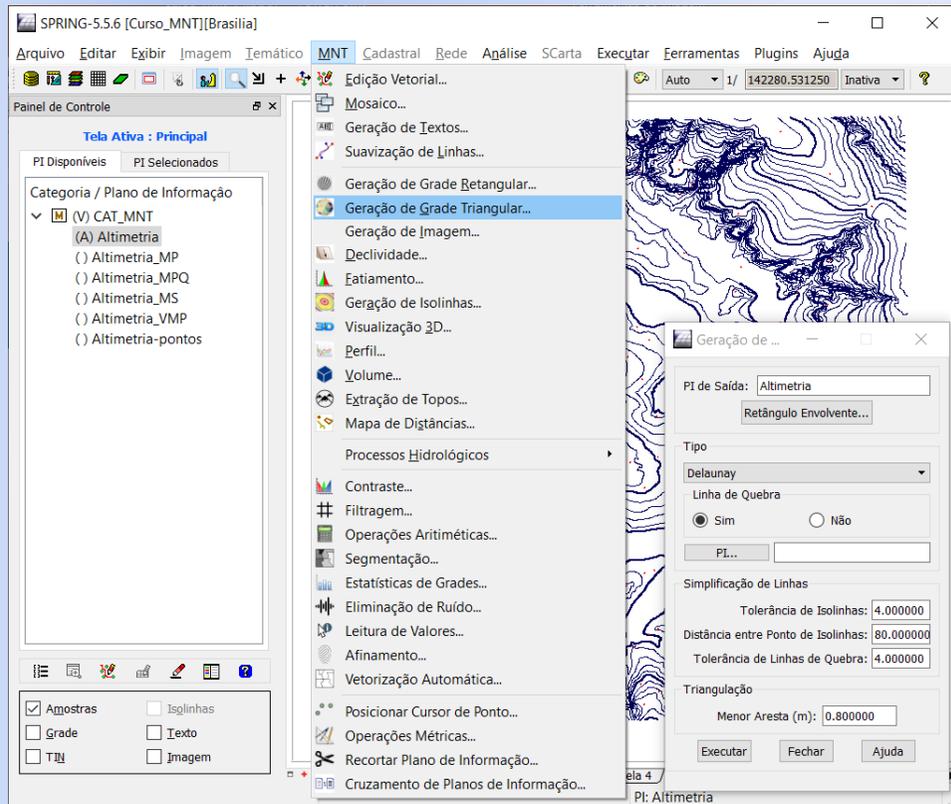
# Modelagem por Grade Triangular: Inserção de Restrições



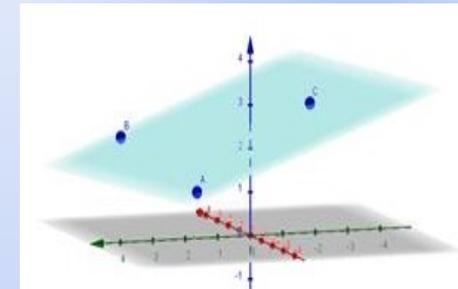
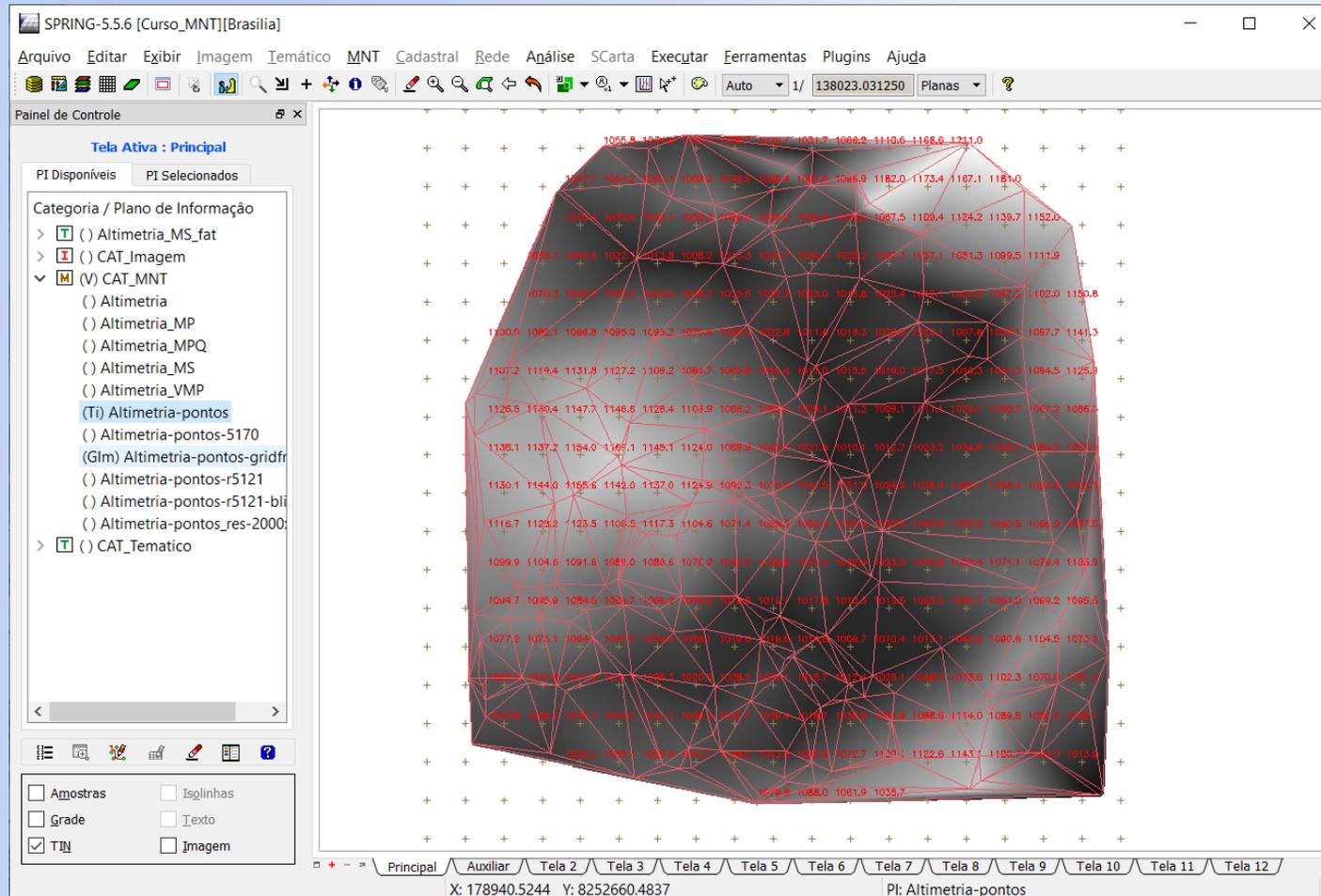
# Modelagem por Grade Triangular: Inserção de Restrições



# Geração de Grade Triangular: Visualização



# Grade Retangular de Grade Triangular



As coordenadas (x, y, z) dos pontos A, B e C (ou 1,2 e 3) de cada triângulo determinam os parâmetros a, b e c da equação do plano:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$

$$z = ax + by + c$$

O valor de z de cada ponto da grade é calculado por sua posição (x, y) no plano que passa pelo triângulo que o contém.

# Modelagem Numérica por Grades: Comparação

	<i>Grade triangular</i>	<i>Grade regular</i>
Vantagens	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Melhor representação de relevo complexo</li><li>2. Incorporação de restrições como linhas de crista</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Facilita manuseio e conversão</li><li>2. Adequada para geofísica e visualização 3D</li></ol>
Problemas	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Complexidade de manuseio</li><li>2. Inadequada para visualização 3D</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Representação de relevo complexo</li><li>2. Cálculo de declividade</li></ol>

# Modelagem Numérica por Grades: Validação

SPRING-5.5.6 [Curso\_MNT][Brasilia]

Arquivo Editar Exibir Imagem Temático MNT Cadastral Rede Análise SCarta Executar Ferramentas Plugins Ajuda

Painel de Controle

Tela Ativa : Principal

PI Disponíveis PI Selecionados

Categoria / Plano de Informação

- > T () Altimetria\_MS\_fat
- > I () CAT\_Imagem
- ✓ M (V) CAT\_MNT
  - () Altimetria
  - (Im) Altimetria\_MP
  - () Altimetria\_MPQ
  - () Altimetria\_MS
  - () Altimetria\_VMP
  - (A) Altimetria-pontos
  - () Altimetria-pontos-5170
  - () Altimetria-pontos-gridrom
  - () Altimetria-pontos-r5121
  - () Altimetria-pontos-r5121-bli
  - () Altimetria-pontos\_res-2000
- > T () CAT\_Tematico

Validação

Planos de Informação

Validação... Altimetria\_MP

Referência... Altimetria-pontos

Fator Amostragem: 1

Associação de Classes

Validação: [dropdown]

Referência: [dropdown]

Associar Desassociar

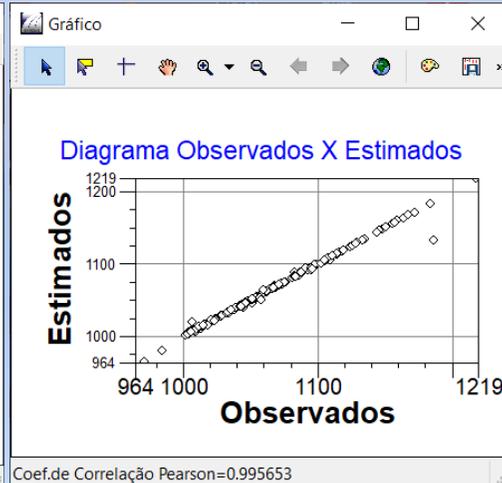
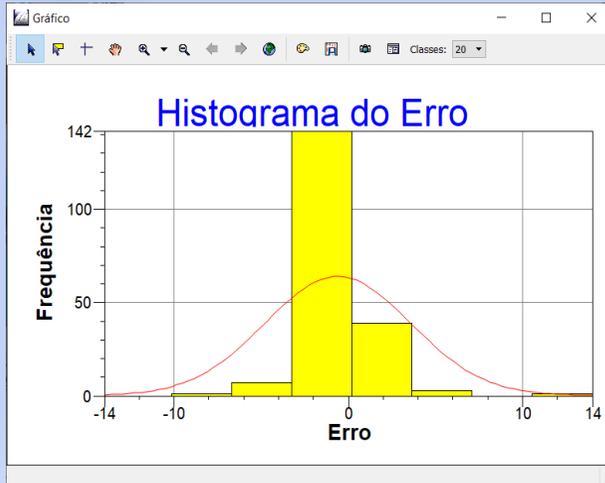
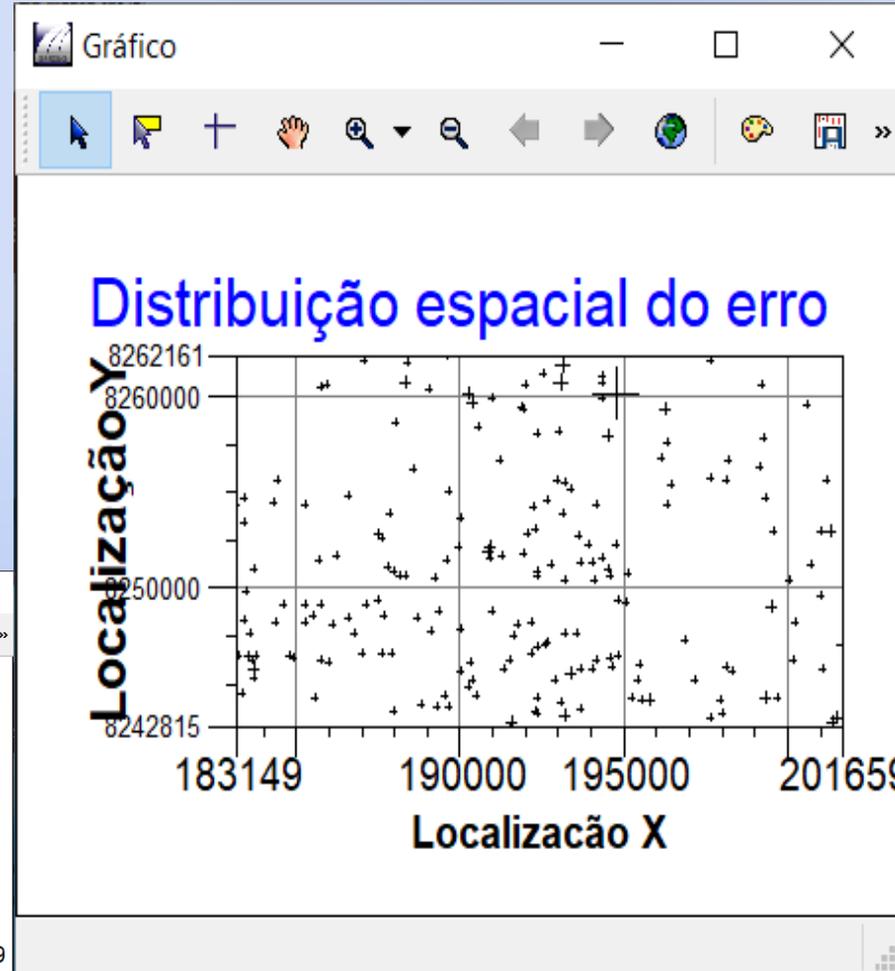
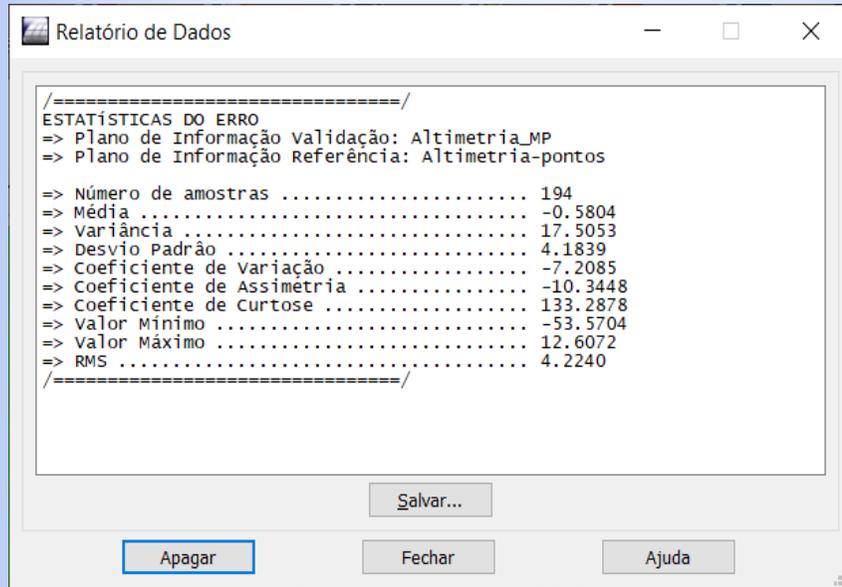
Executar Fechar Ajuda

Principal Auxiliar Tela 2 Tela 3 Tela 4 Tela 5 Tela 6 Tela 7 Tela 8 Tela 9 Tela 10 Tela 11 Tela 12

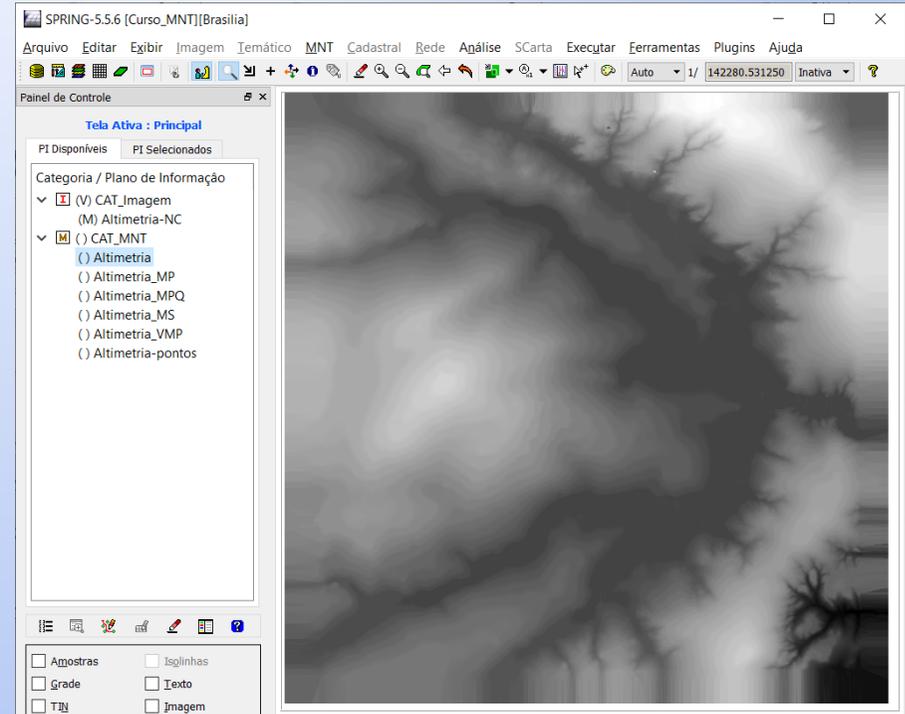
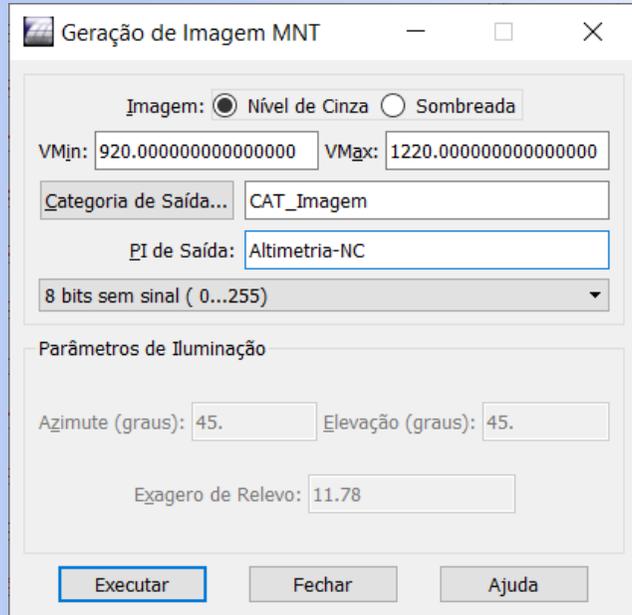
X: 186953.4291 Y: 8262841.0925

PI: Altimetria-pontos

# Modelagem Numérica por Grades: Validação



# Aplicações: Geração de Imagem



*Imagem MNT Nível de Cinza – Quantização dos valores de z*

- Mapeamento linear dos valor de cota (Z) para nível de cinza

$Z_{min} \rightarrow 1$  e  $Z_{max} \rightarrow 255$



# Aplicações: Geração de Imagem

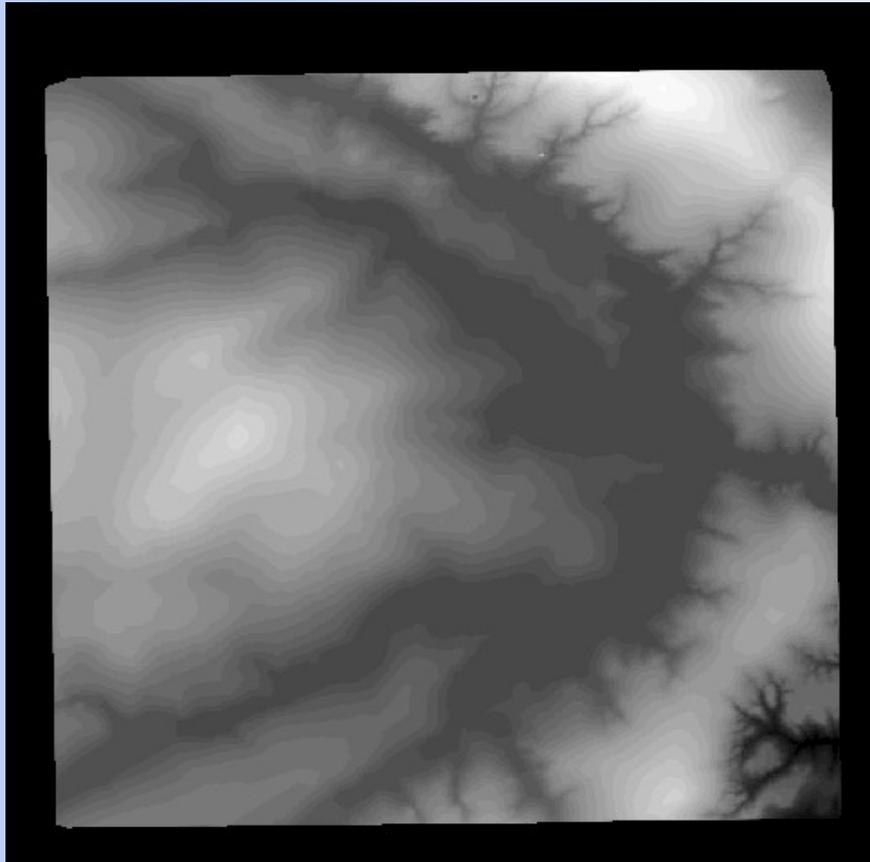


Imagem em Nível de Cinza

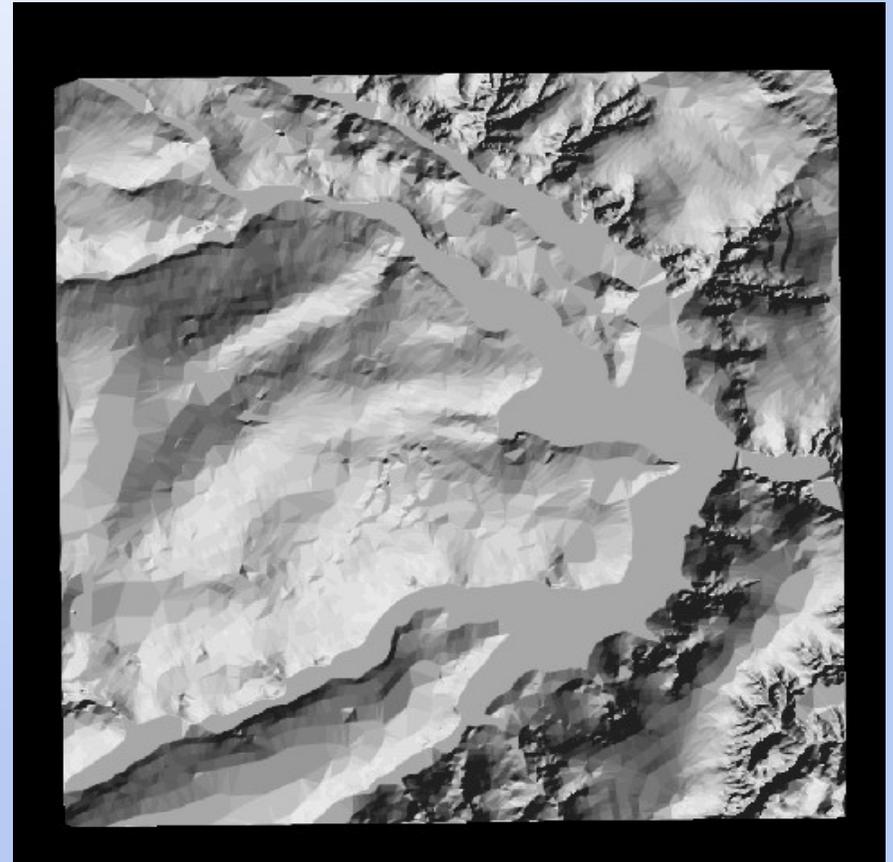
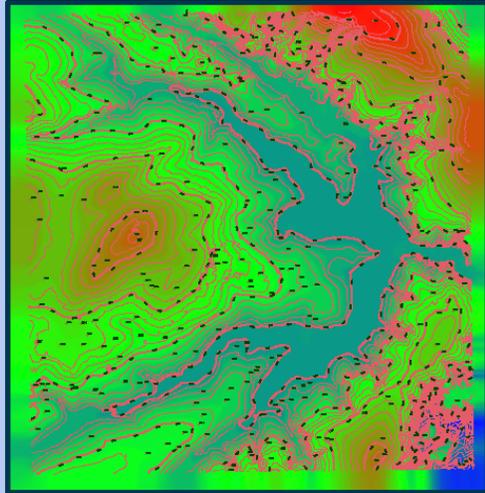


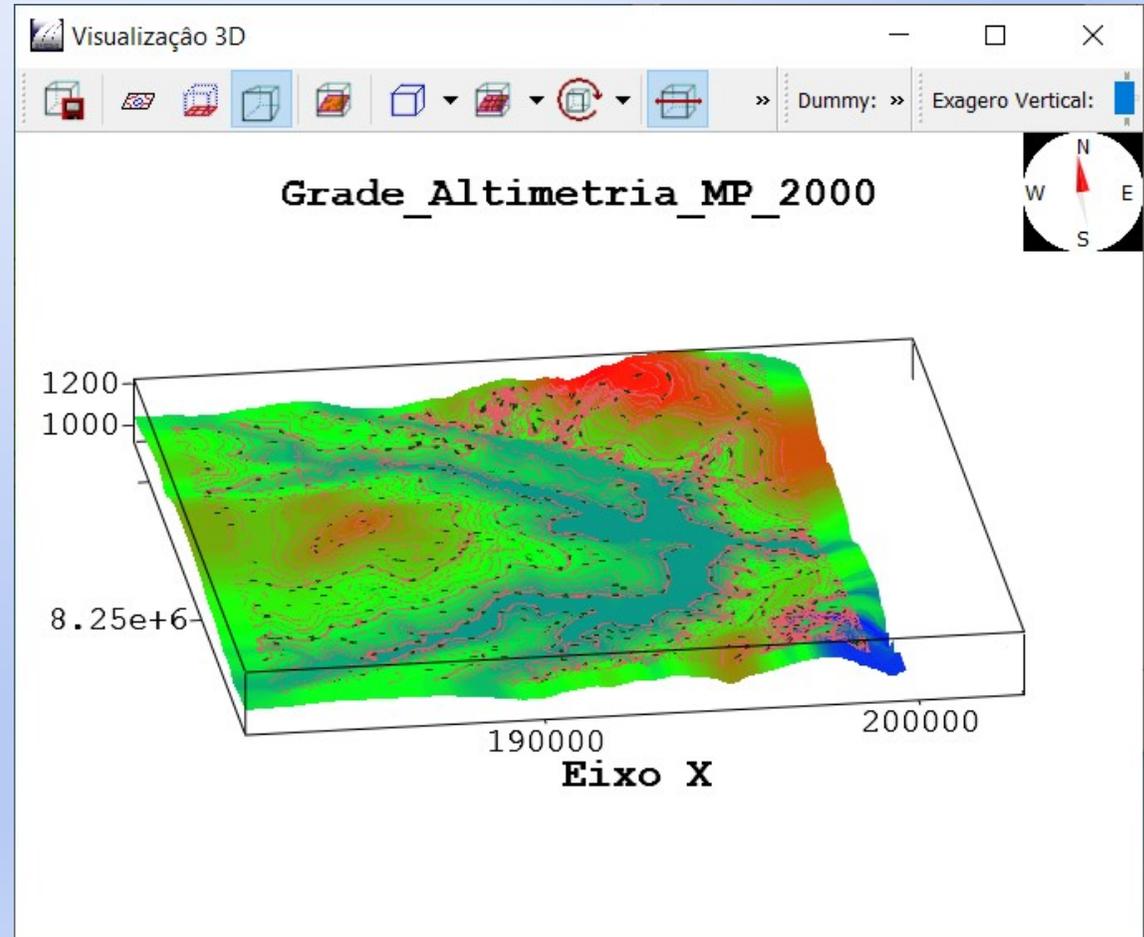
Imagem Sombreada

# Aplicações

## Projeção Geométrica Planar



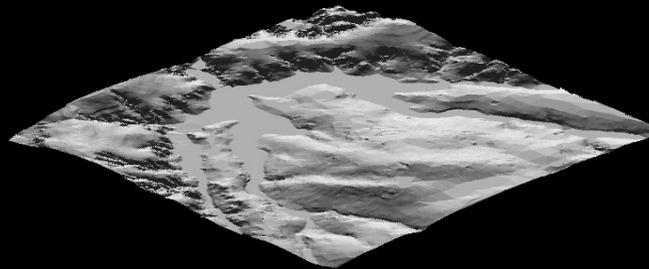
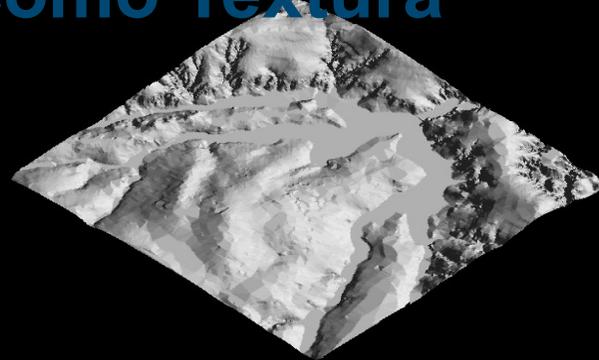
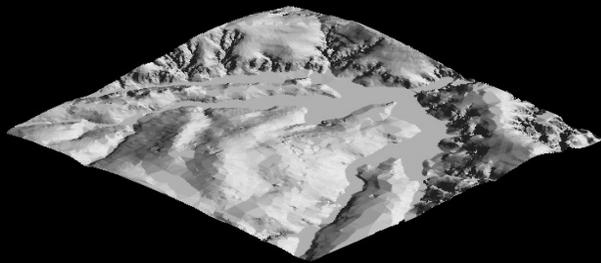
Modelo Digital de Terreno 3D, representado por uma grade regular, é projetado no plano 2D juntamente com uma imagem de textura (imagem sombreada ou imagem de sensoriamento remoto).



# Aplicações

## Projeção Geométrica Planar

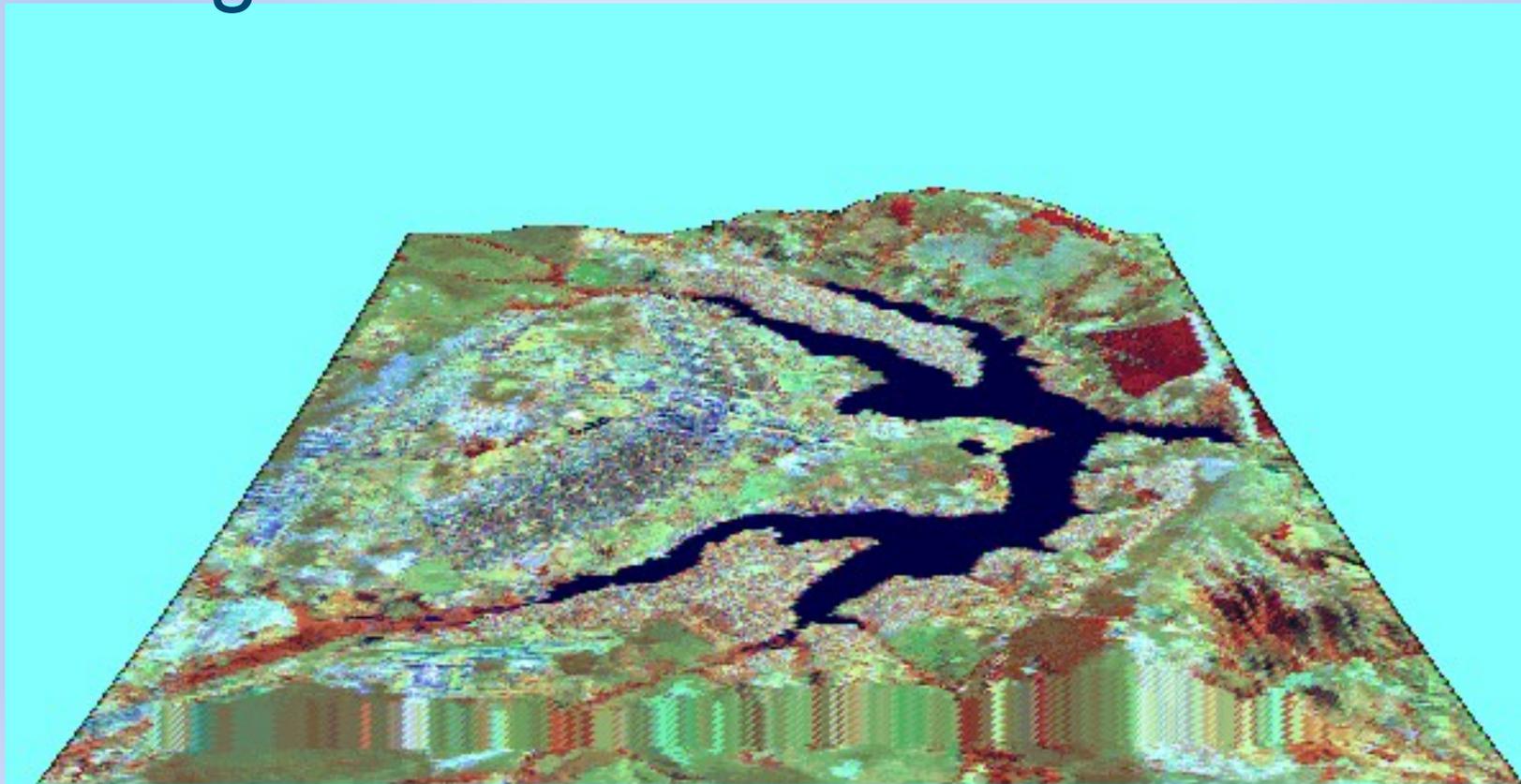
### Projeção Paralela com Imagem Sombreada como Textura



Aplicações:

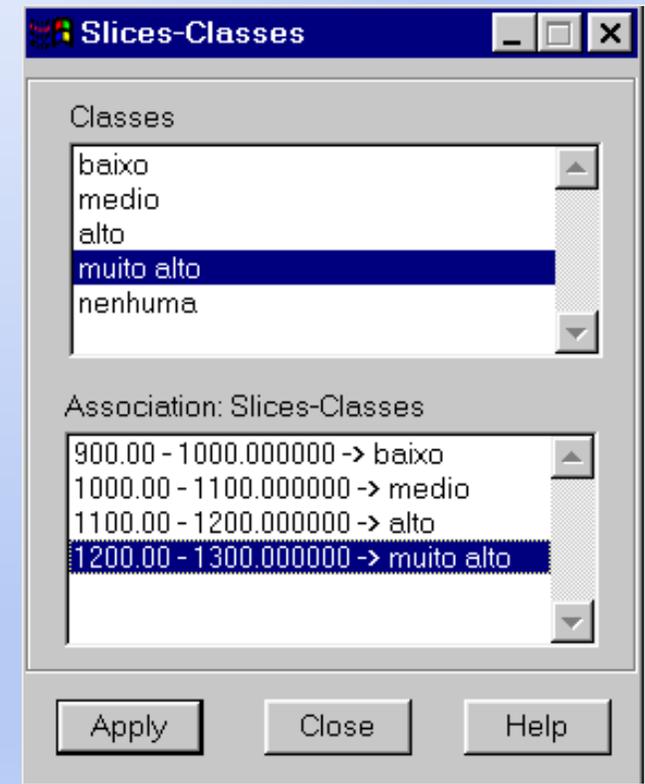
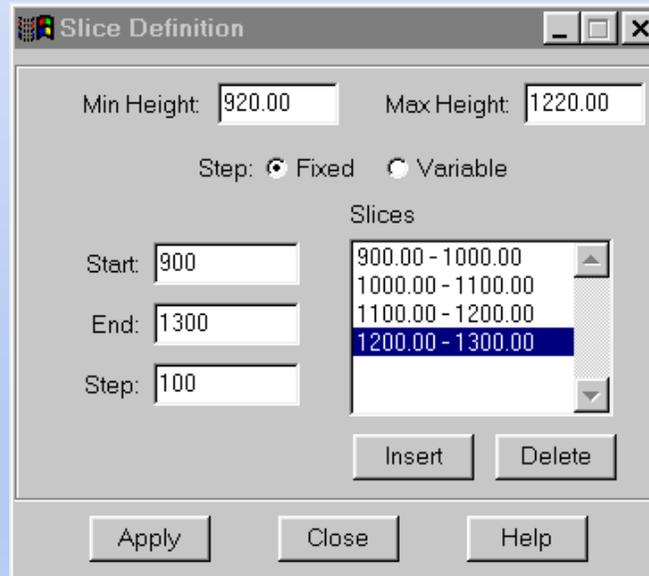
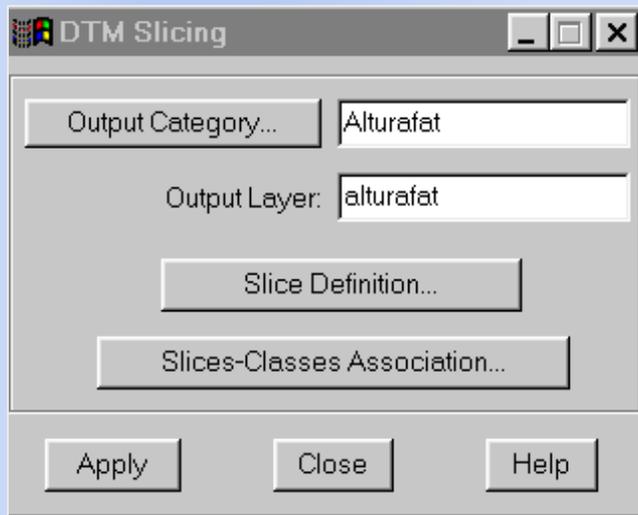
Projeção Geométrica Planar

Projeção Perspectiva do Modelo com  
Imagem de Sensoriamento Remoto

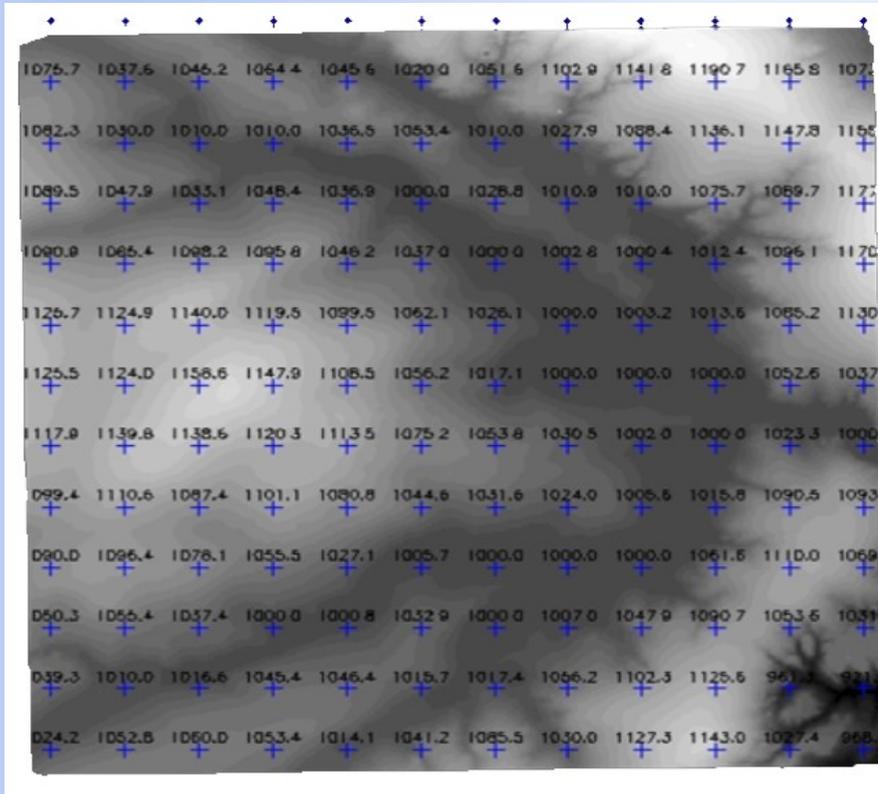


# Aplicações: Fatiamento

Classificação de um MNT através da *definição* de faixas de valores e *associação* desses valores com classes pré-definidas.



# Aplicações: Fatiamento de MNT



Grade MNT com Imagem em Nível de Cinza ao fundo

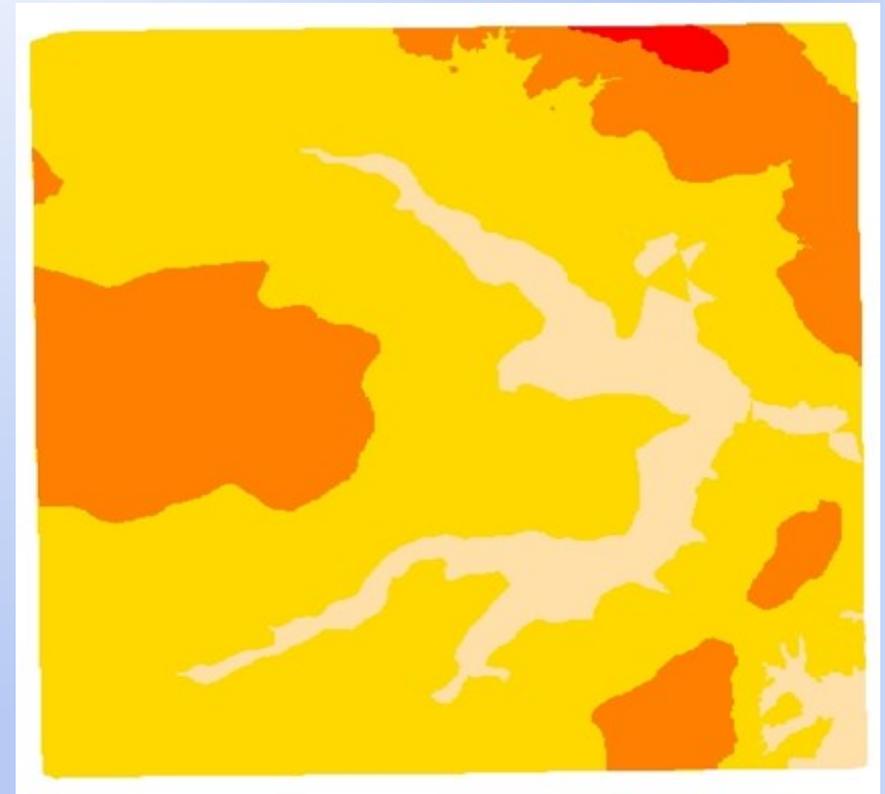


Imagem de Alturas Fatiada (920-1000-1100-1200-1220)

# Aplicações:

## Mapa de Declividade e Exposição

### Grades Retangulares

A declividade e a exposição são obtidas a partir da definição do vetor gradiente.

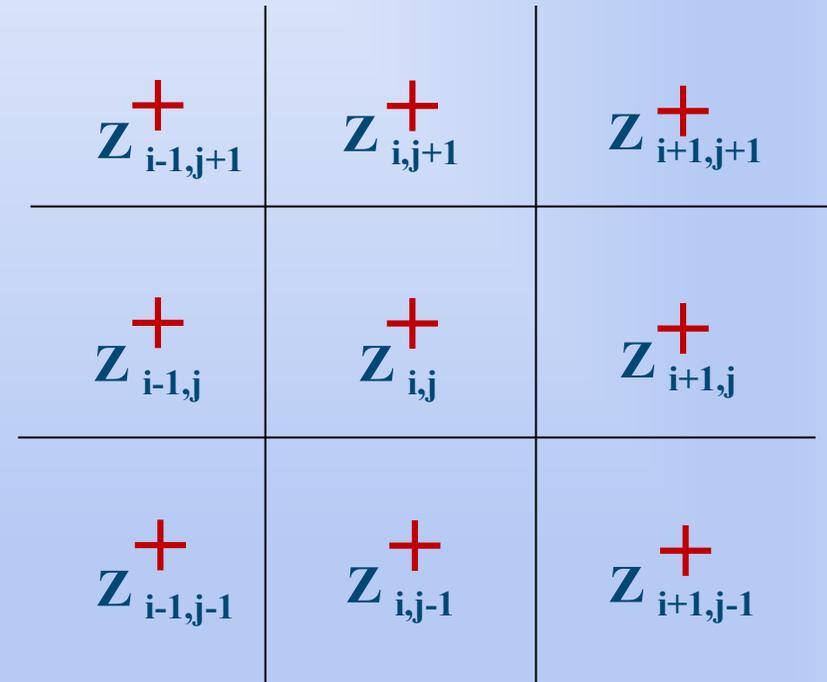
$$D = \arctg \{[(\delta Z/\delta X)^2 + (\delta Z/\delta Y)^2]^{1/2}\}$$

$$E = \arctg [-(\delta Z/\delta Y) / (\delta Z/\delta X)] \quad (-\Pi < E < \Pi)$$

Uma metodologia para grade regular

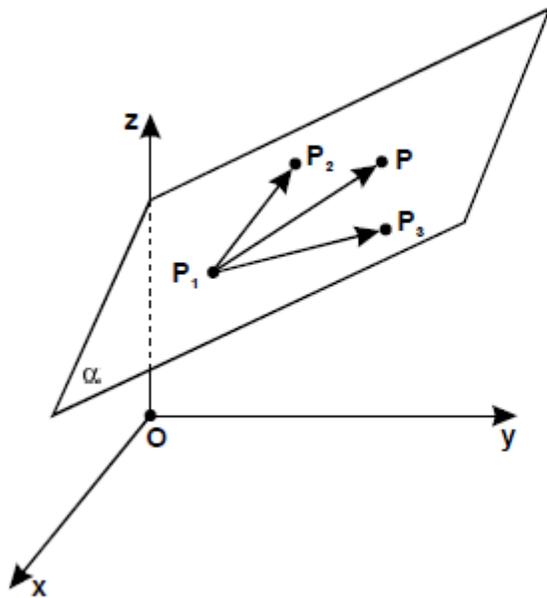
$$[\delta Z/\delta X]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + 2*Z_{i+1,j} + Z_{i+1,j-1}) - (Z_{i-1,j+1} + 2*Z_{i-1,j} + Z_{i-1,j-1})] / 8*\delta X$$

$$[\delta Z/\delta Y]_{i,j} = [(Z_{i+1,j+1} + 2*Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j+1}) - (Z_{i+1,j-1} + 2*Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1})] / 8*\delta Y$$



# Aplicações: Mapa de Declividade e Exposição Grades Triangulares

c) O plano é definido por três pontos não colineares.



Dados

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1)$$

$$P_2 = (x_2, y_2, z_2)$$

$$P_3 = (x_3, y_3, z_3)$$

O plano  $\alpha$  é determinado pelos pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ . Um ponto genérico  $P = (x, y, z)$  pertence ao plano  $\alpha$  se, e somente se, os vetores  $(P - P_1)$ ,  $(P_2 - P_1)$  e  $(P_3 - P_1)$  forem coplanares:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$

**Equação do plano**

$$z = ax + by + c$$

**sendo:**

$$a = \delta Z / \delta X$$

$$b = \delta Z / \delta Y$$

$$D = \arctg \{ [(\delta Z / \delta X)^2 + (\delta Z / \delta Y)^2]^{1/2} \}$$

$$E = \arctg [ -(\delta Z / \delta Y) / (\delta Z / \delta X) ] \quad (-\Pi < E < \Pi)$$

# Aplicações: Mapa de Declividade

+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1.776	2.211	2.717	2.147	4.004	2.457	5.100	5.984	3.245	2.562	2.435	4.751
1.832	3.563	0.0	0.0	3.133	2.678	0.0	2.686	2.716	1.327	3.698	3.030
3.562	3.802	2.598	1.808	2.258	0.0	2.011	2.079	2.857	5.785	3.354	2.613
2.216	1.889	2.797	1.878	2.724	1.833	0.0	3.134	1.462	2.631	2.117	8.9e-001
1.609	1.164	6.9e-001	3.028	2.415	2.674	1.067	0.0	1.897	3.503	1.575	2.106
9.5e-001	8.8e-001	1.294	1.782	1.513	1.631	3.076	0.0	0.0	0.0	2.089	8.327
4.1e-001	1.423	2.049	1.246	1.286	2.210	1.101	5.7e-001	1.306	0.0	5.032	0.0
1.362	1.644	1.560	1.278	1.958	2.919	2.290	2.170	2.638	3.336	1.614	2.203
0.0	9.5e-001	1.507	1.656	3.236	1.494	0.0	0.0	0.0	4.522	4.0e-002	5.640
2.4e-001	2.427	1.084	0.0	2.815	1.162	0.0	1.822	4.486	2.907	10.7	3.312
2.568	0.0	5.420	1.368	8.8e-001	3.953	2.118	2.666	2.252	1.328	5.917	3.781
3.108	1.348	0.0	6.4e-001	1.308	7.138	1.613	2.952	2.116	4.405	29.3	3.059
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Grade regular de declividade

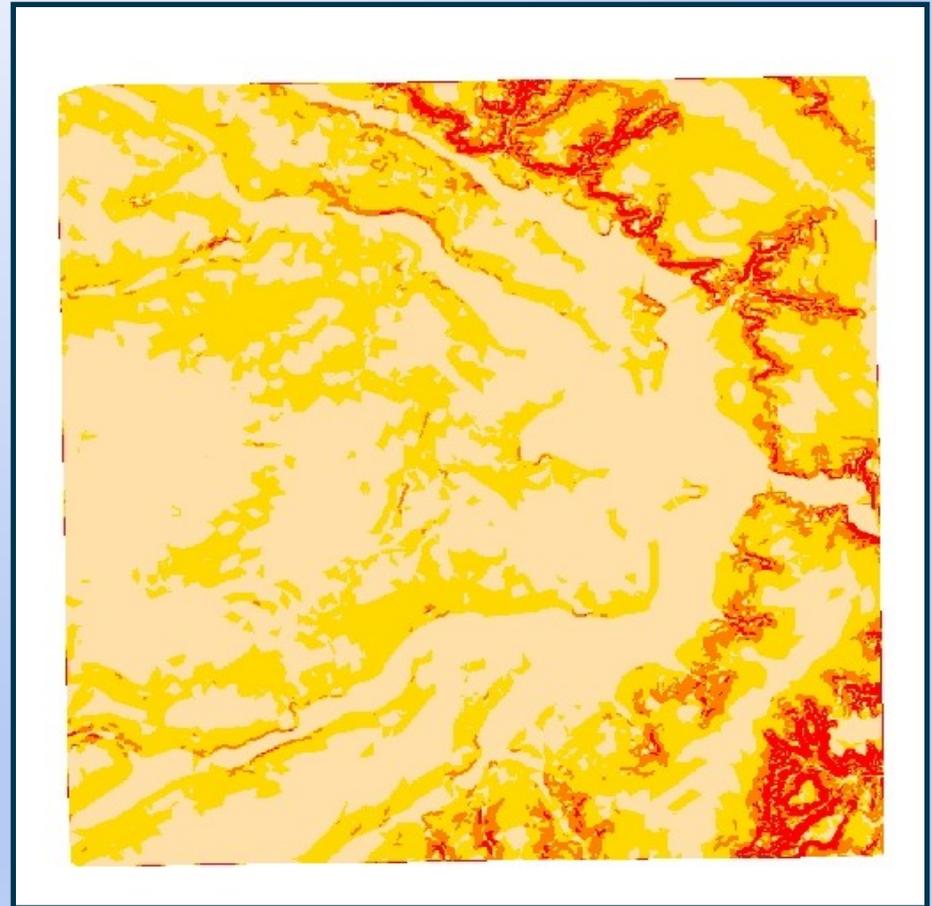


Imagem de declividade fatiada  
(0-2, 2-5, 5-10 e >10)

# Aplicações: Análise de Perfis

Profile

Input:  Grid  TIN

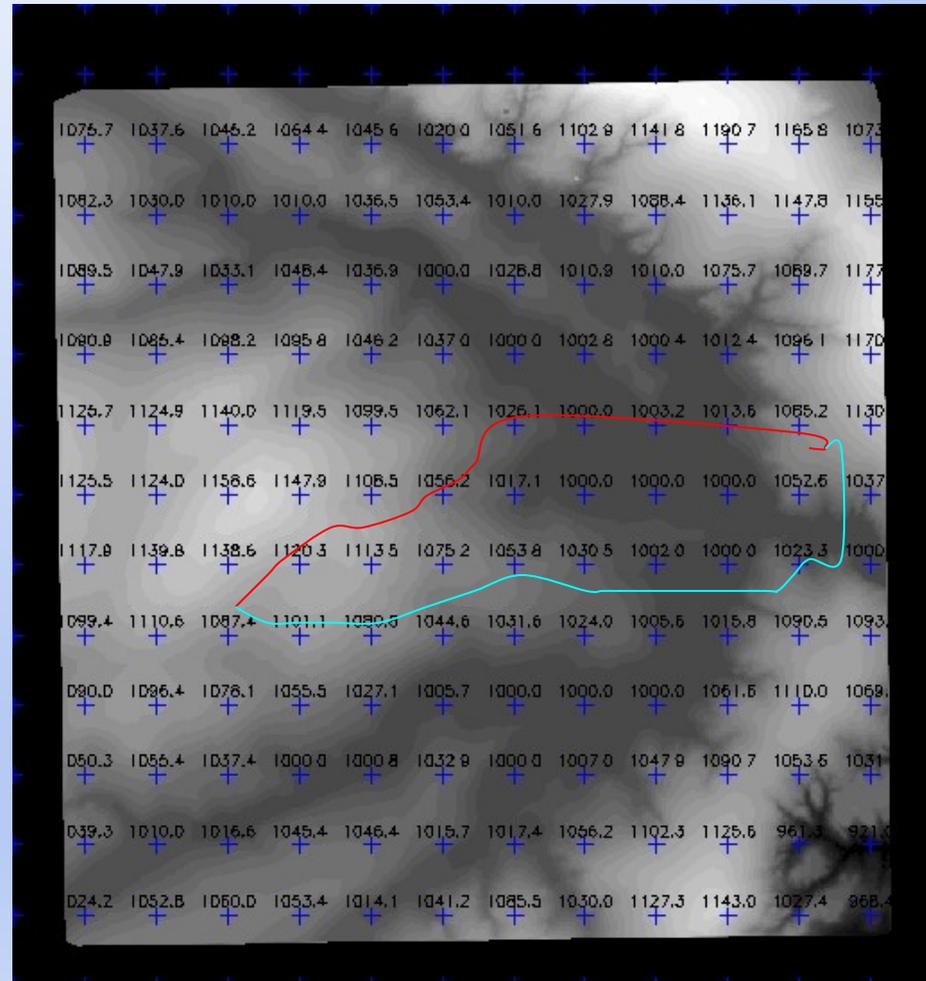
Trajectory:  Editor  Layer

Lines:  Create  Delete

Points:  Create  Move  Delete

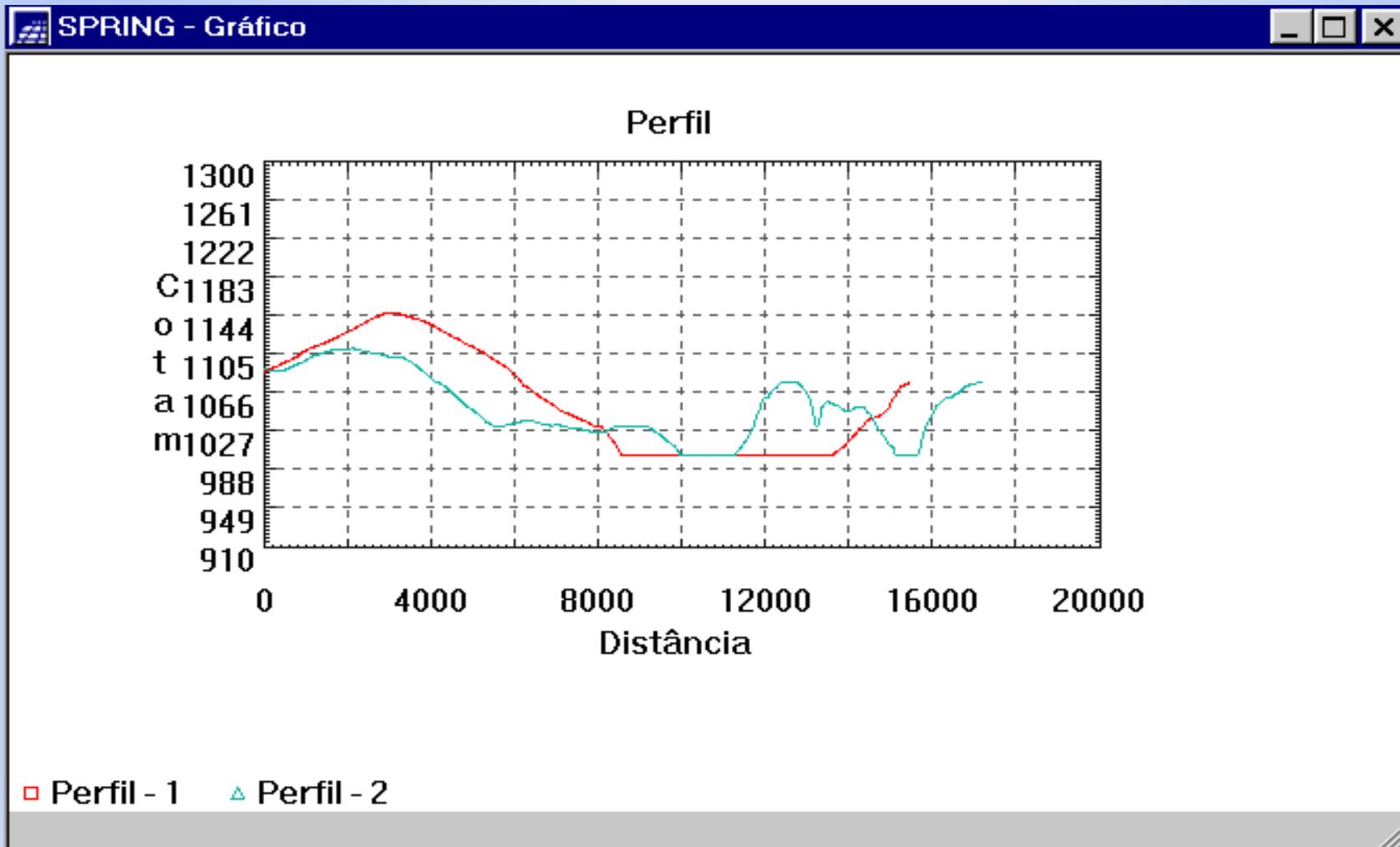
Graphic Title:

Y Axis:  Unit:

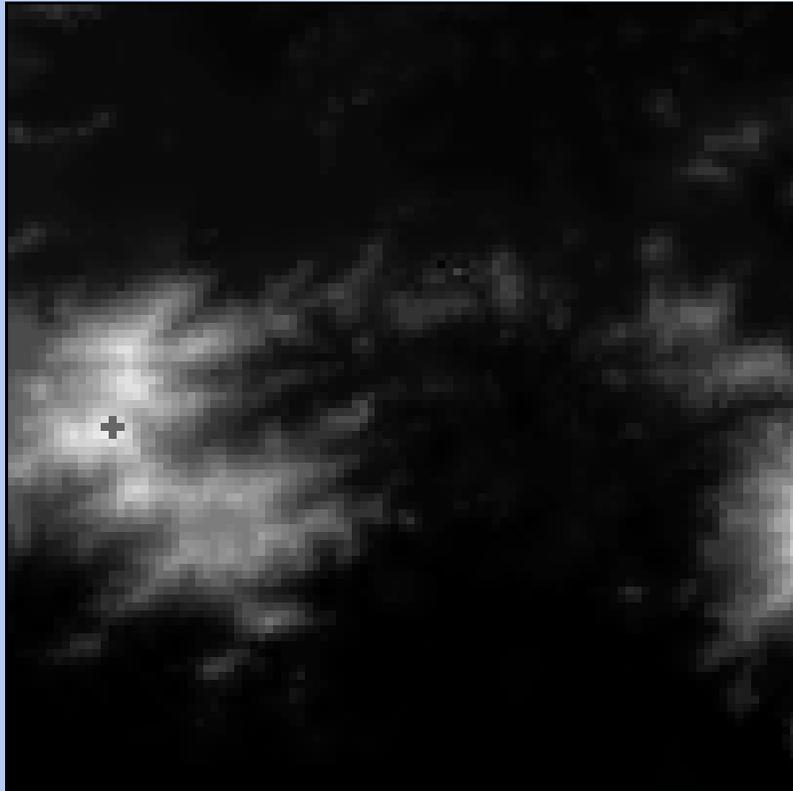


Determinação das trajetórias

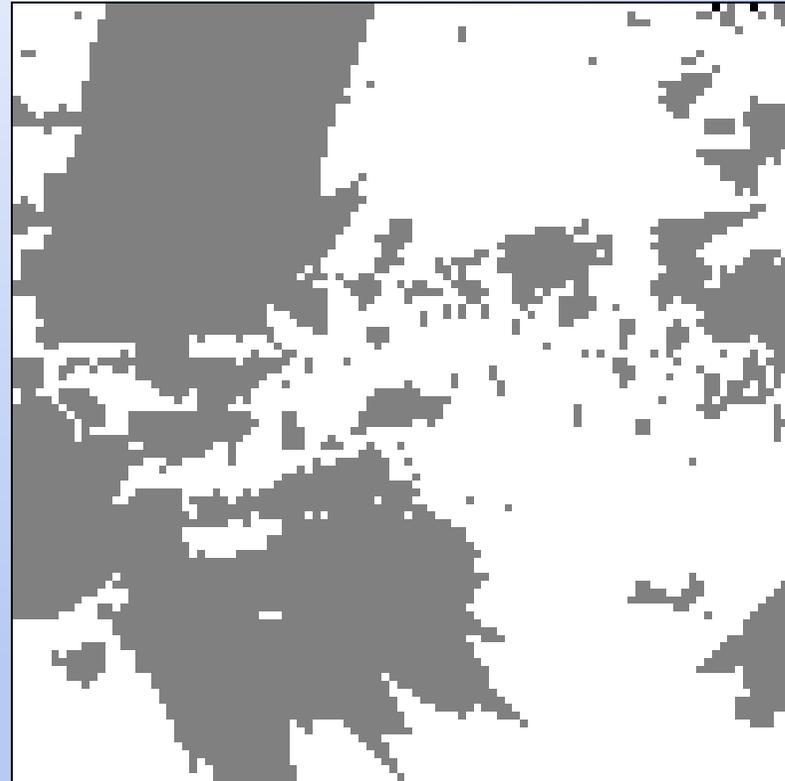
# Aplicações: Análise de Perfis



# Aplicações: Mapas de Visibilidade

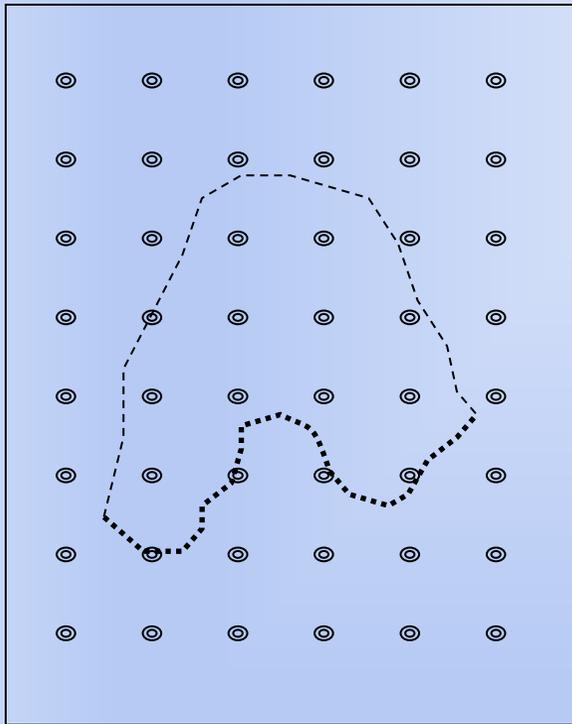


**Modelo de Grade Regular**



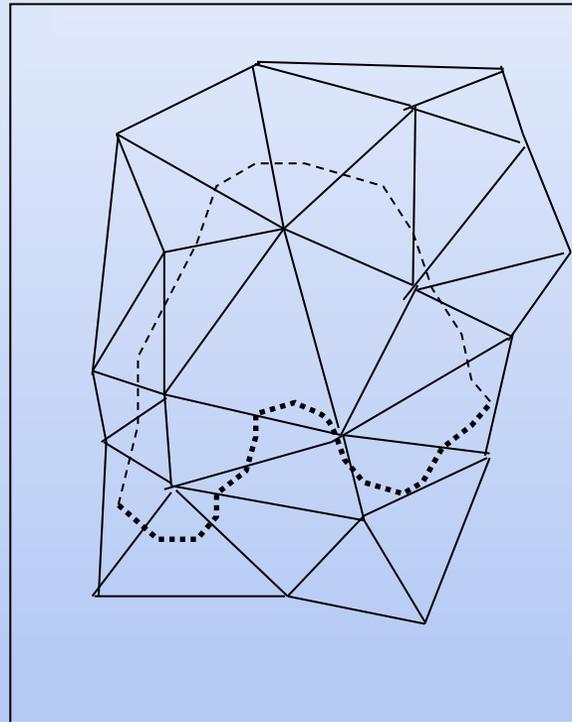
**Mapa de visibilidade**

# Aplicações: Mapas de isolinhas



(a)

**Grade Regular**



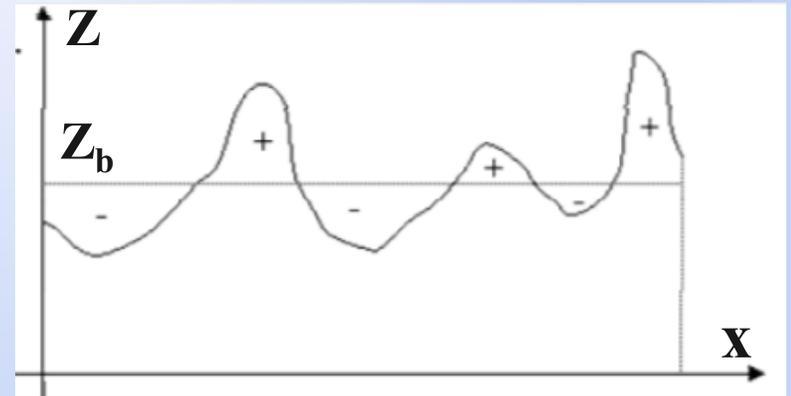
(b)

**Malha triangular**

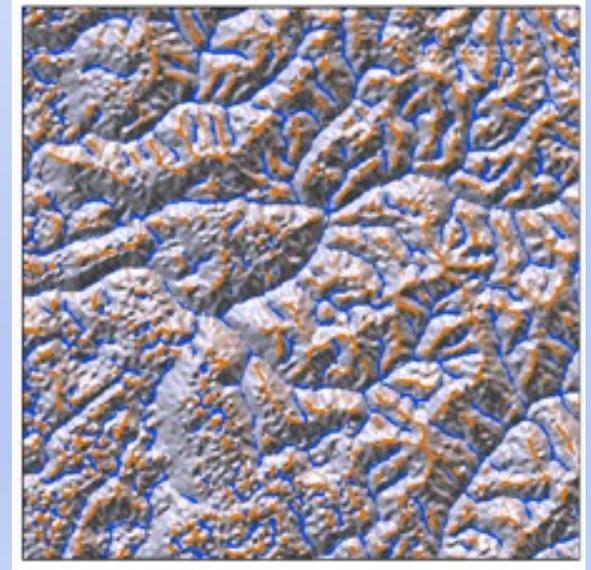
**Interpolações nas  
arestas das células  
retangulares ou  
triangulares.  
Isolinhas mais suaves  
dependem de modelo  
mais refinado.**

# Aplicações: Outras

- Cálculo de volumes  
Volumes de corte e aterro em relação à uma cota  $Z_b$  base.



- Geração Automática de Drenagens e Bacias  
(ver TerraHidro)
- Outras.....



# Referências

Burrough, P. A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon Press – Oxford – London.

Burrough, P.A.; McDonell, R.; Principles of Geographical Information Systems. Oxford, Oxford University Press, 1998.

Câmara, G.; Davis.C.; Monteiro, A.M.; D'Alge, J.C. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos, INPE, 2001 (on-line, 2a. edição, revista e ampliada. Disponível na web em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html> ).

Felgueiras, C.A. Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores. (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987. 92p.

Felgueiras C. A. e Goodchild M. F., 1995. "Two Papers on Triangulated Surface Modeling". Relatório Técnico 95-2 do National Center for Geographic Information and Analysis - NCGIA. University of California, Santa Barbara, CA, U.S.A..

Foley, J.D.; van Dam, A.; Feiner, S.K.; Hughes, J.F. Computer graphics: principles and practice. 2.ed. Reading, MA, USA, Addison-Wesley, 1991. 1175

McCullagh M. J. 1988. Terrain and surface modelling systems: theory and practice. Photogrammetric Record, 12(2), pp. 747-779.

Namikawa, L.M. A method for triangular grid surface fitting using breaklines. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 30(4):362-368, 1994.

Rosim, S.; Felgueiras, C.A.; Namikawa, L.M. Uma metodologia para geração de MNT por grades triangulares. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, Brasil, 1993. Anais. v.2, p. 420-427.