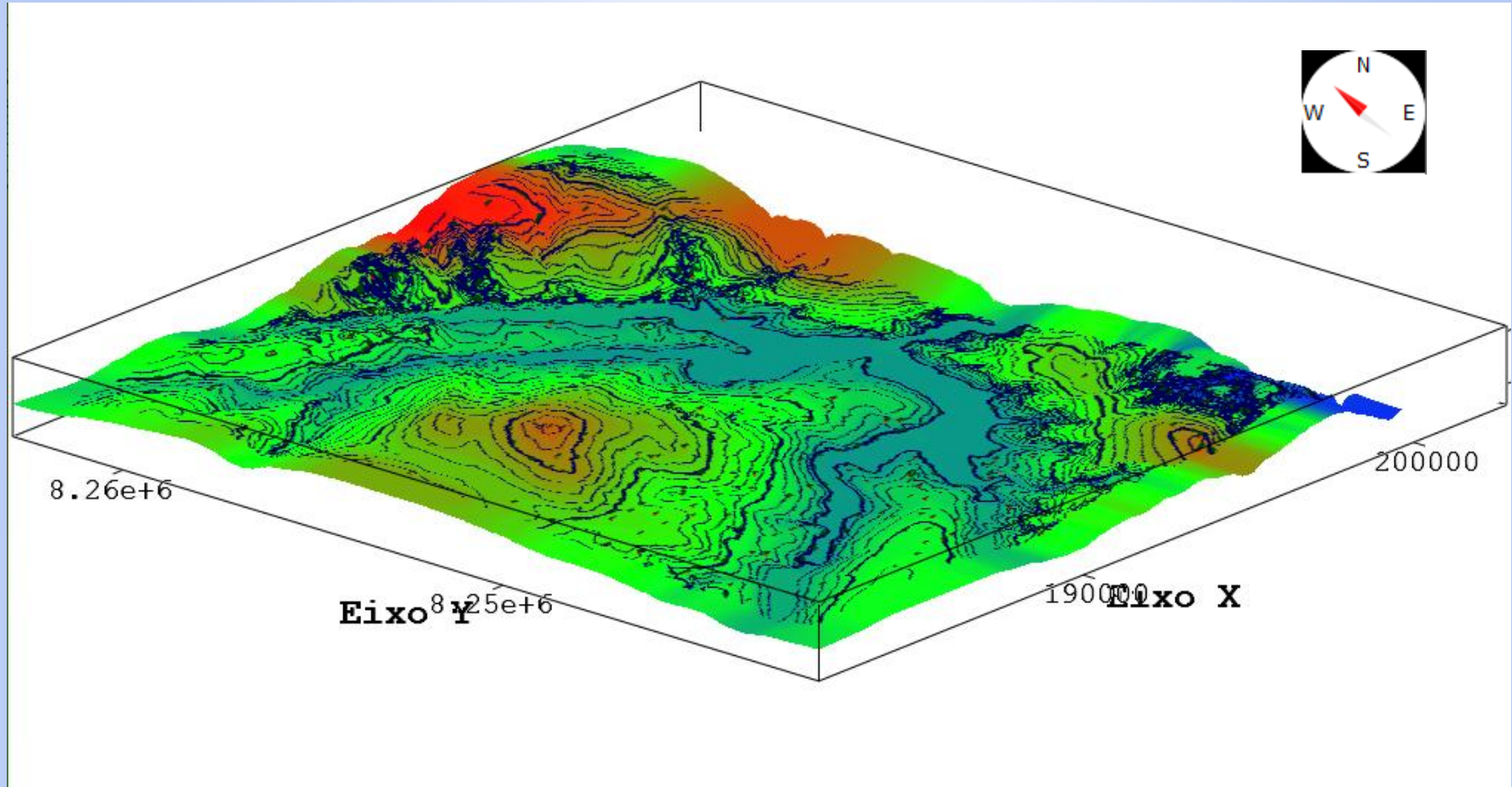


MODELAGEM NUMÉRICA DE TERRENO



Carlos A Felgueiras

MATERIAL DE
WWW.DPI.INPE.BR/PUBLIC/MNT

Modelo Numérico de Terreno

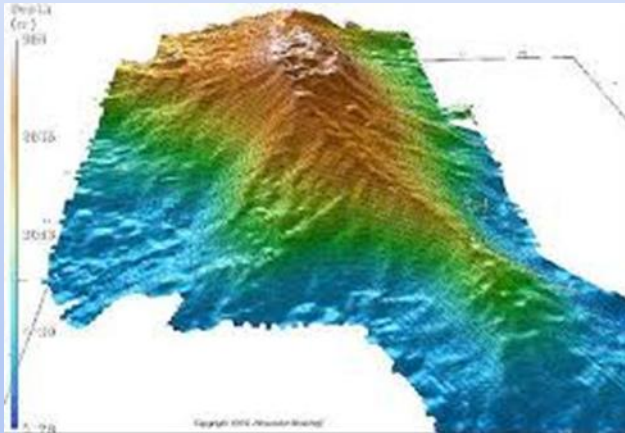
- Definição
 - Um MNT descreve a variação espacial contínua de uma grandeza sobre uma região geográfica. Exemplos: Temperatura, velocidade de vento, precipitação, teor geoquímico ou geofísico, altimetria,....



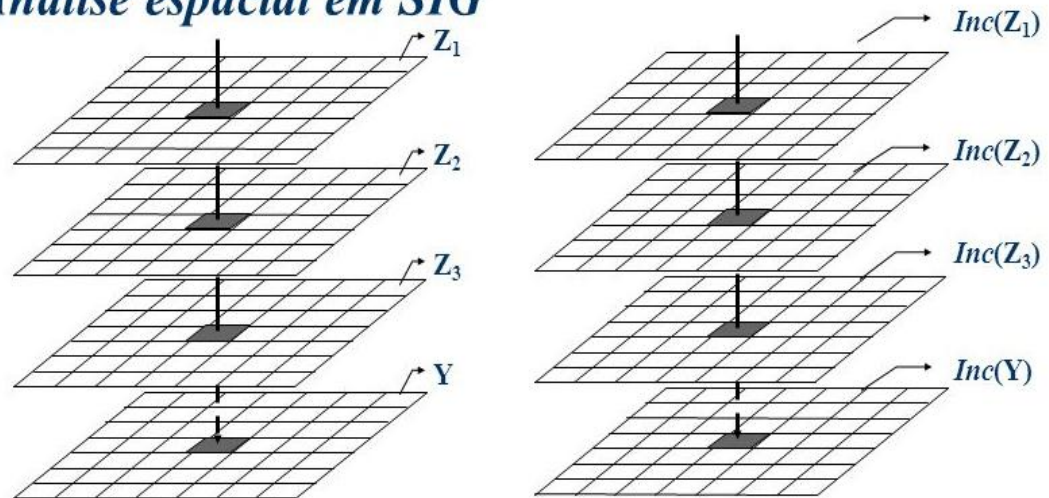
- MDT – Modelo digital de Terreno
- DTM – Digital Terrain Model
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- DEM - Digital Elevation Model - Topografia

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)

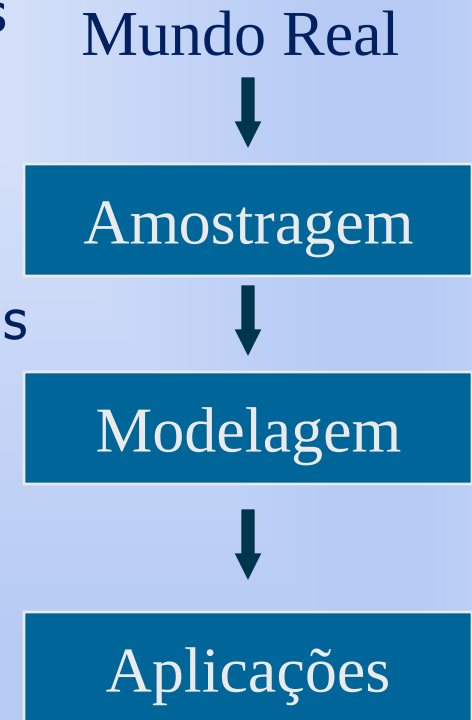
Z_3 = Pluviosidade, Temperatura, Declividade... (MNT)

Y = Aptidão Agrícola

Inc = Qualifica local/e os dados (mapas)

Modelo Numérico de Terreno

- 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...



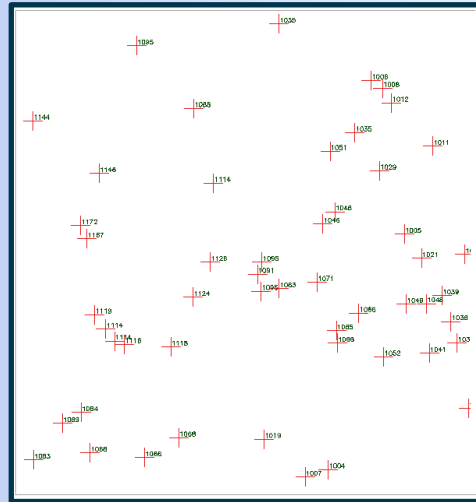
Modelo Numérico de Terreno

- 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

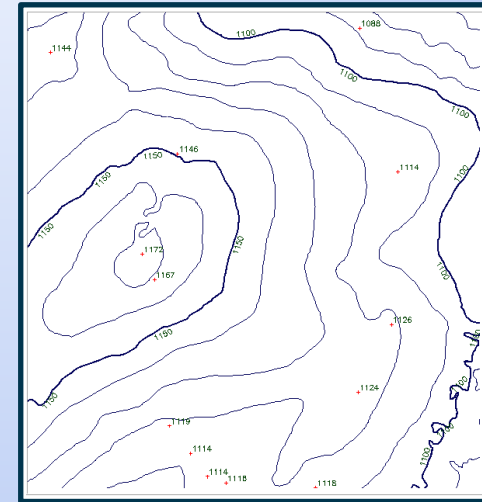
Estruturas de Representação Computacional:

Pontual

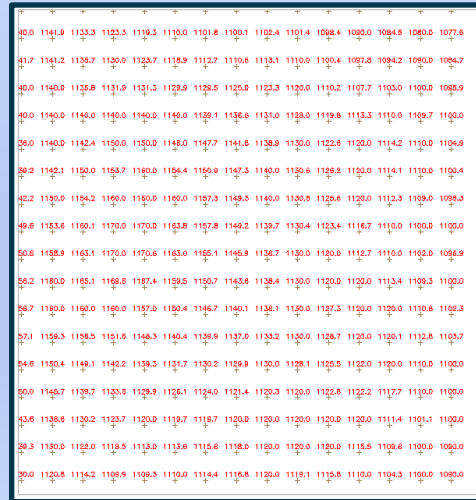


Isolinhas

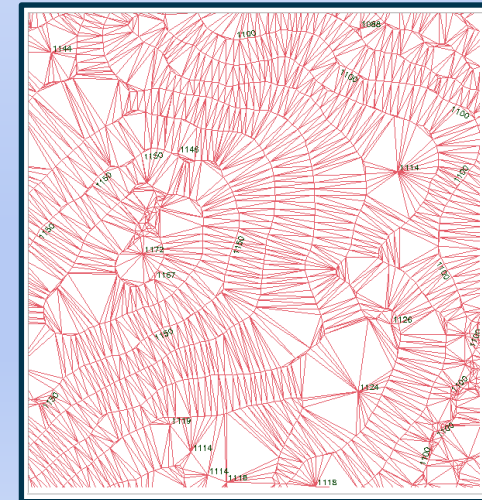
Isolinhas
+
Pontos



Grade Retangular
(Matricial)



Grade Triangular
(TIN)

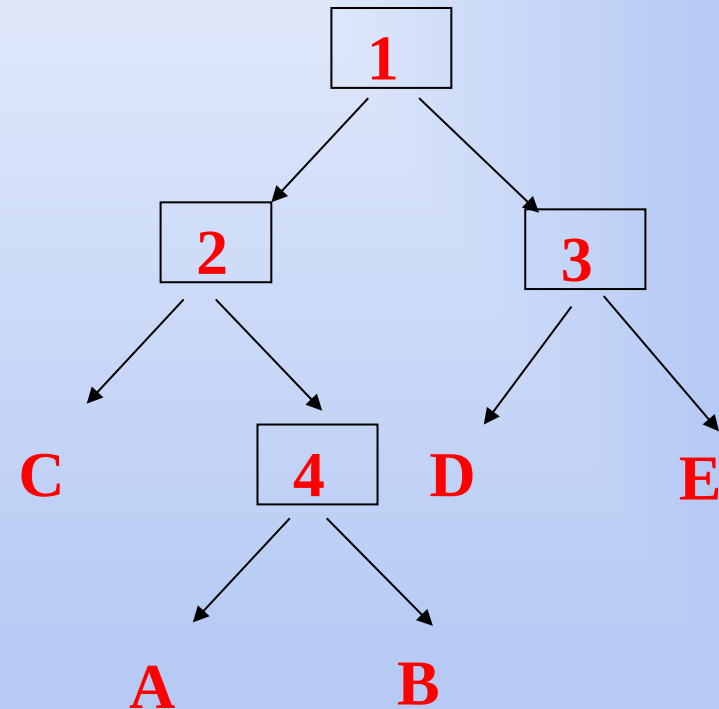
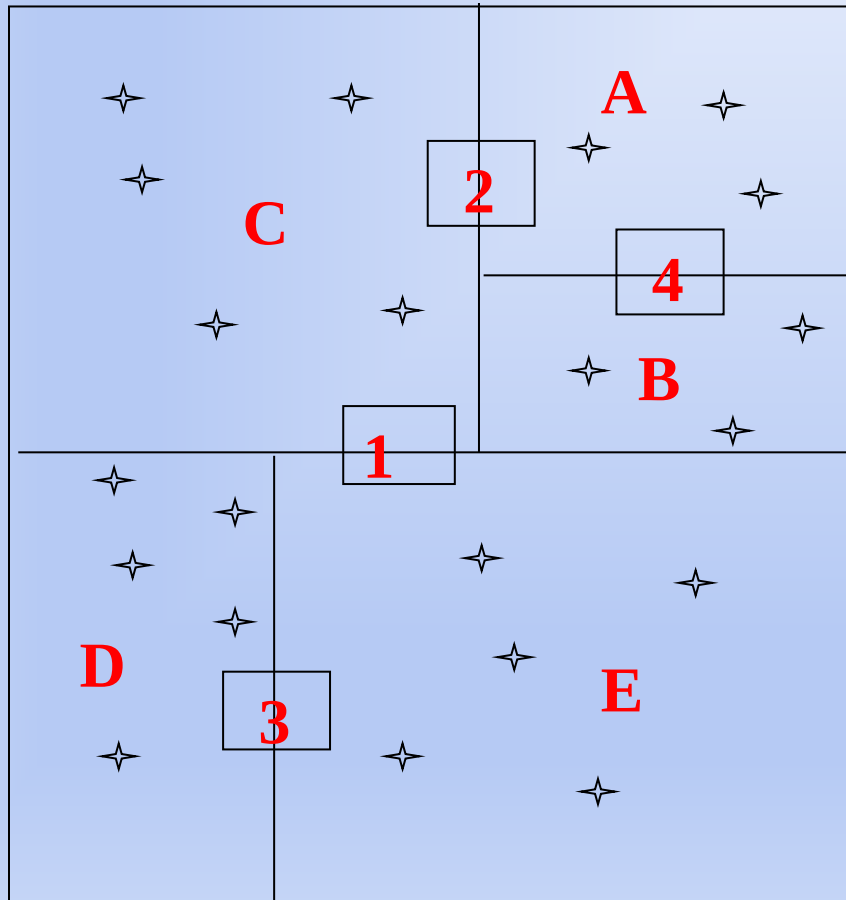


Entrada e Edição (Amostragem)

- 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)

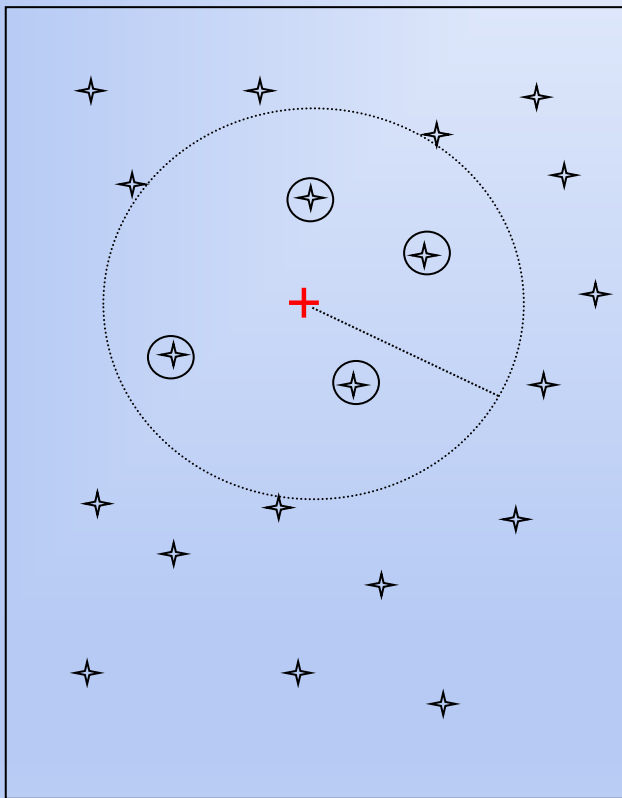
Partição do espaço



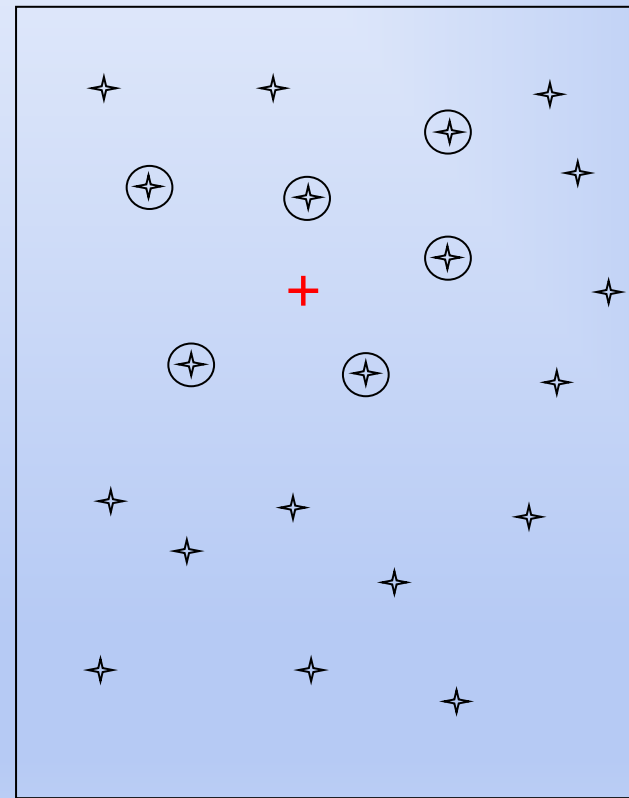
Árvore 2kD

Entrada e Edição (Definição da vizinhança)

Raio de influência



Número de vizinhos



⊙ Ponto da grade

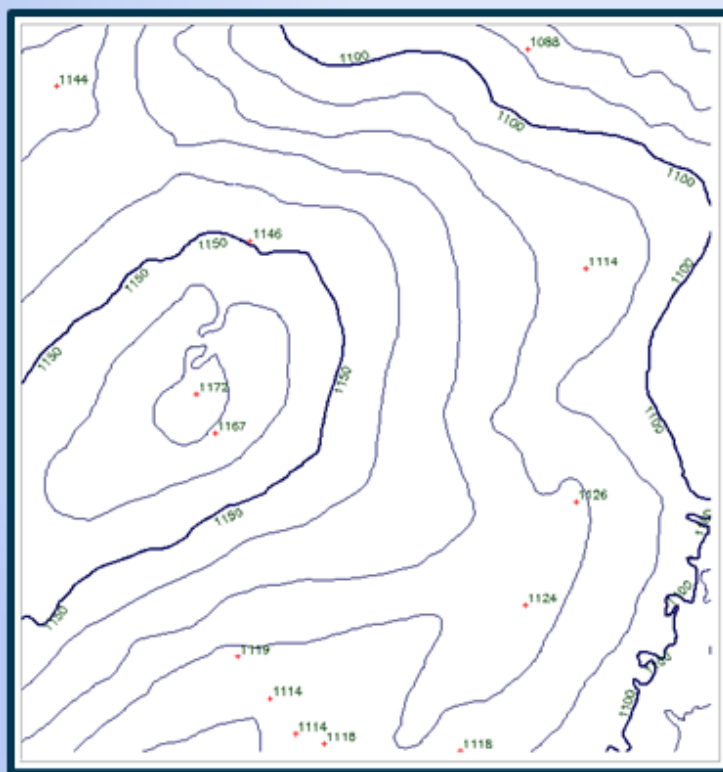
★ Ponto amostral

⊕ Amostras vizinhas

Entrada e Edição

Amostras

Pontos 3D e Isolinhas



Line Checking

Z Value:	1070.00	Change
Demand:	invalido	Change
Positive Imp.:	invalido	Change
Negative Imp.:	invalido	Change

Line Type

☐ Breakline ☒ Isoline

Draw Close Help

Linha corrente: 217

Points

Z Value:	1032.00
Demand:	invalido
Impedance:	invalido

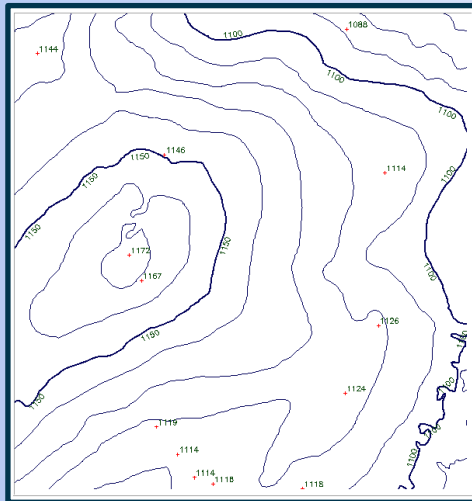
Update Close Help

Ponto 3D corrente: 169

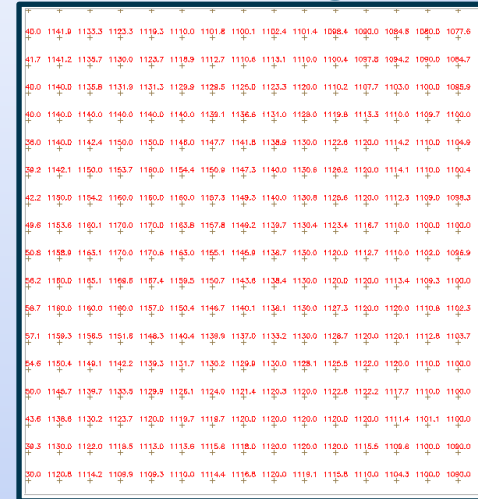
Modelagem Numérica por Grades

Amostras

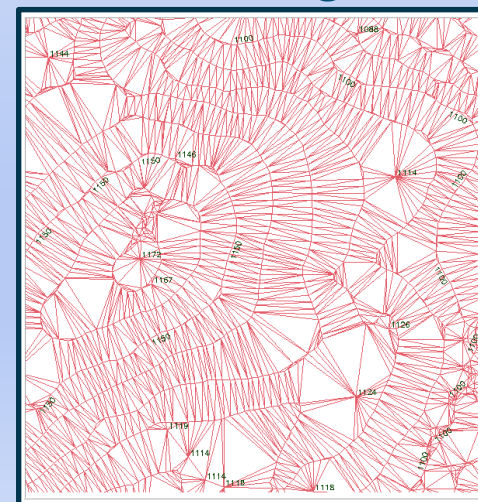
Pontos 3D e Isolinhas



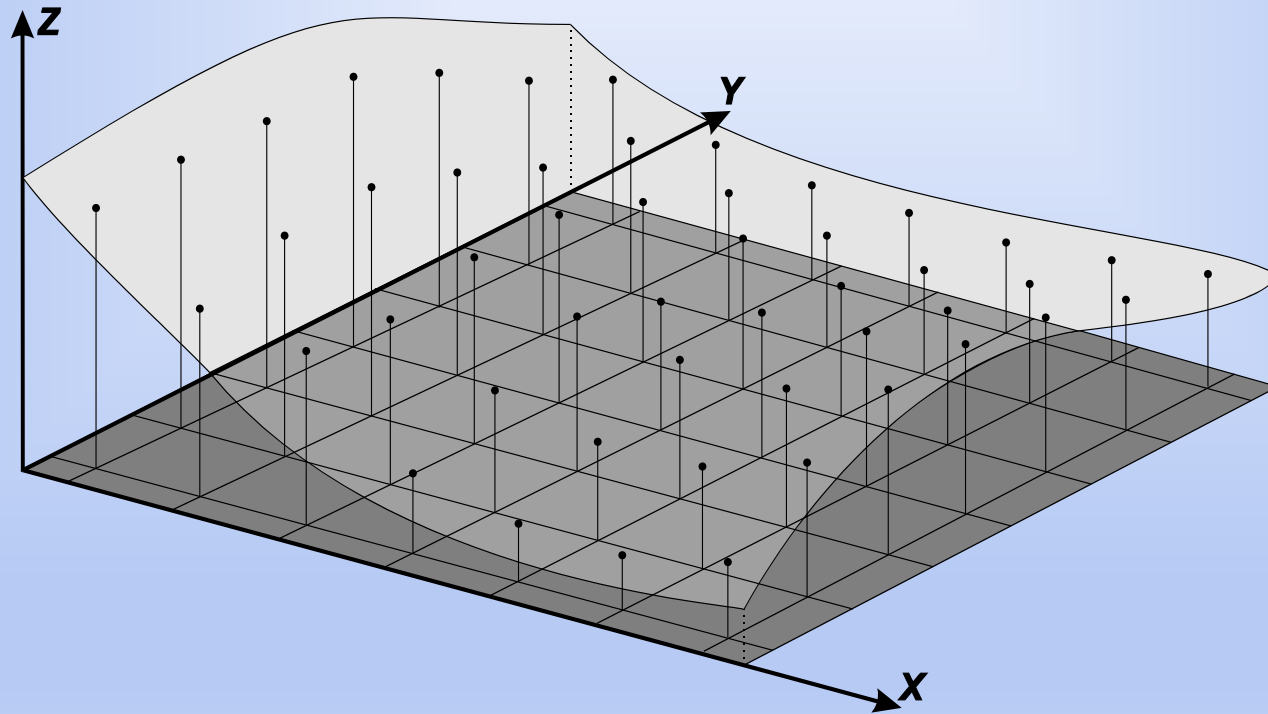
Grade retangular



Grade triangular



Modelagem por Grade Regular

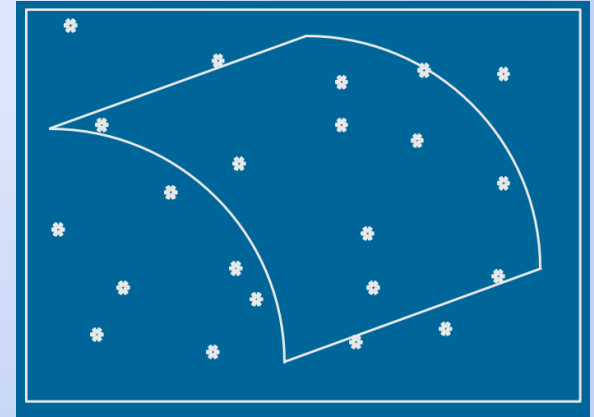


Modelagem por Grade Regular (Interpolação Espacial)

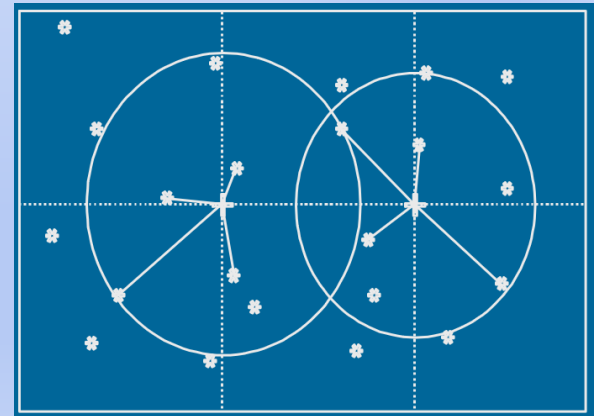
- Interpolação Espacial
 - processo de estimar grandezas a partir de amostras na área de estudo
 - (usualmente) grandeza deve ser quantizada
- Lei de Tobler para SIG
 - pontos vizinhos no espaço tem valores mais correlacionados que pontos distantes

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

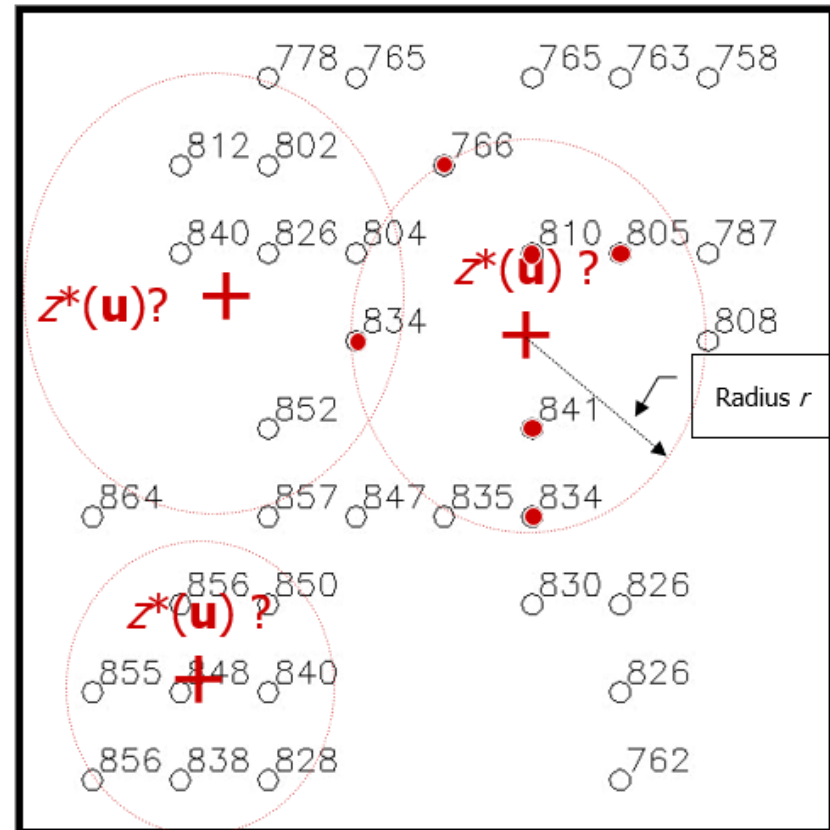


Modelagem por Grade Regular: Interpoladores Locais

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

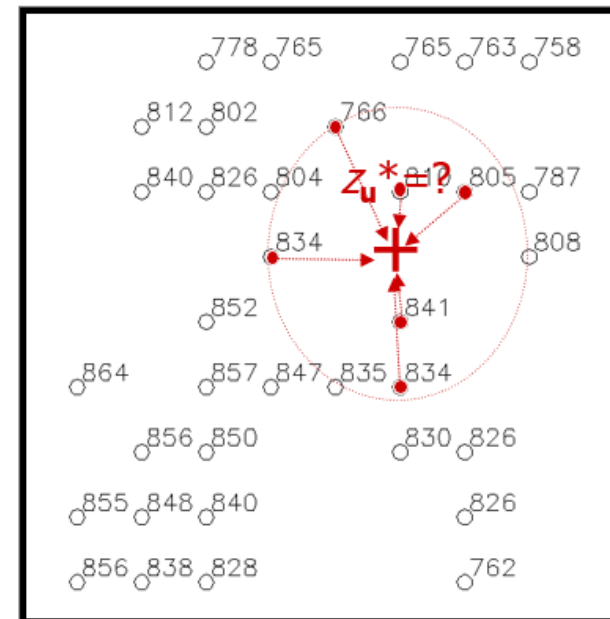
$w_{\alpha\mathbf{u}}$ is the weight of sample α at location $\mathbf{u}$

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 **u**

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

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

Interpolators:

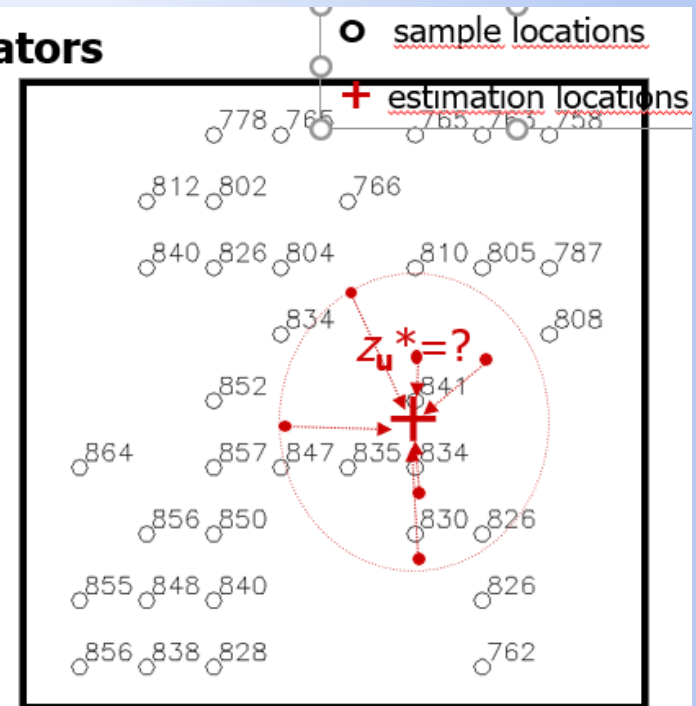
- **IDW – Inverse Distance Weighted** when
- **IDW Optimized (Quadrants)**

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

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

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

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



Geração de Grade Retangular (Interpolador de Média Local)

• Rectangular Grids with Local Mean Interpolators

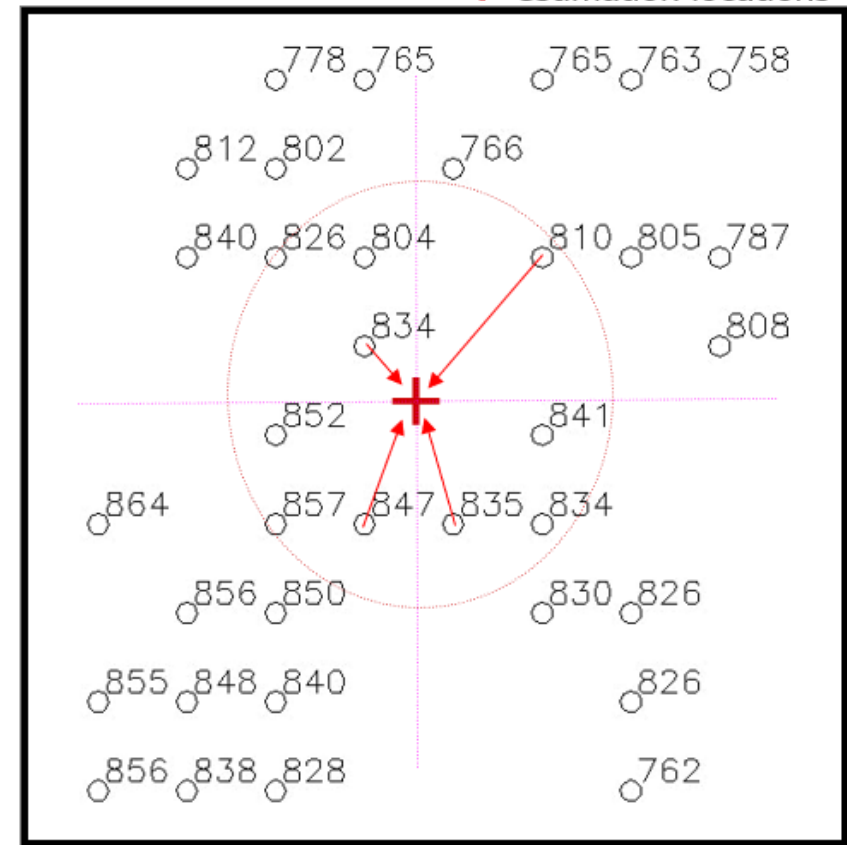
IDW Optimized (Quadrants)

- 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

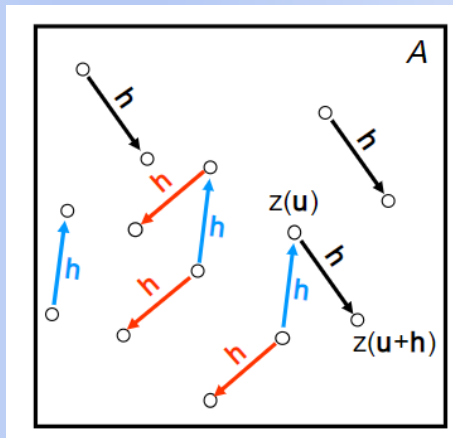


IDW considering quadrant locations

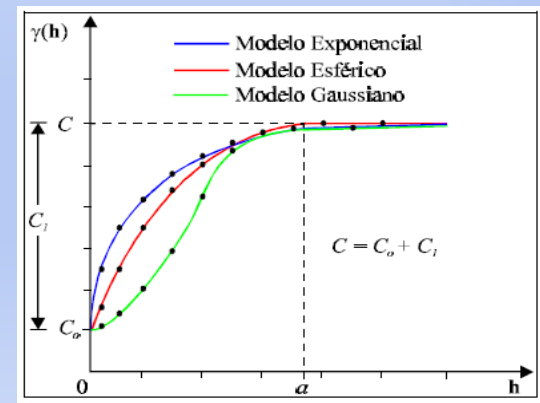
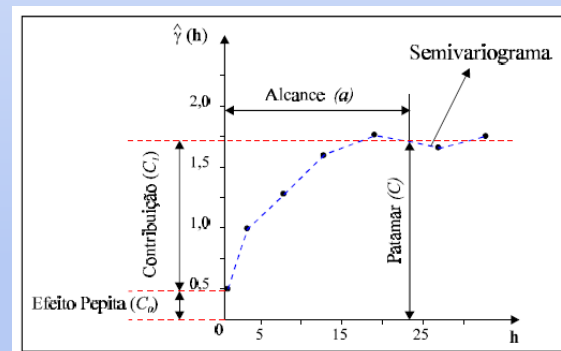
Modelagem por Grade Regular: Interpoladores Locais

Definição do raio de influência: **Variograma**

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

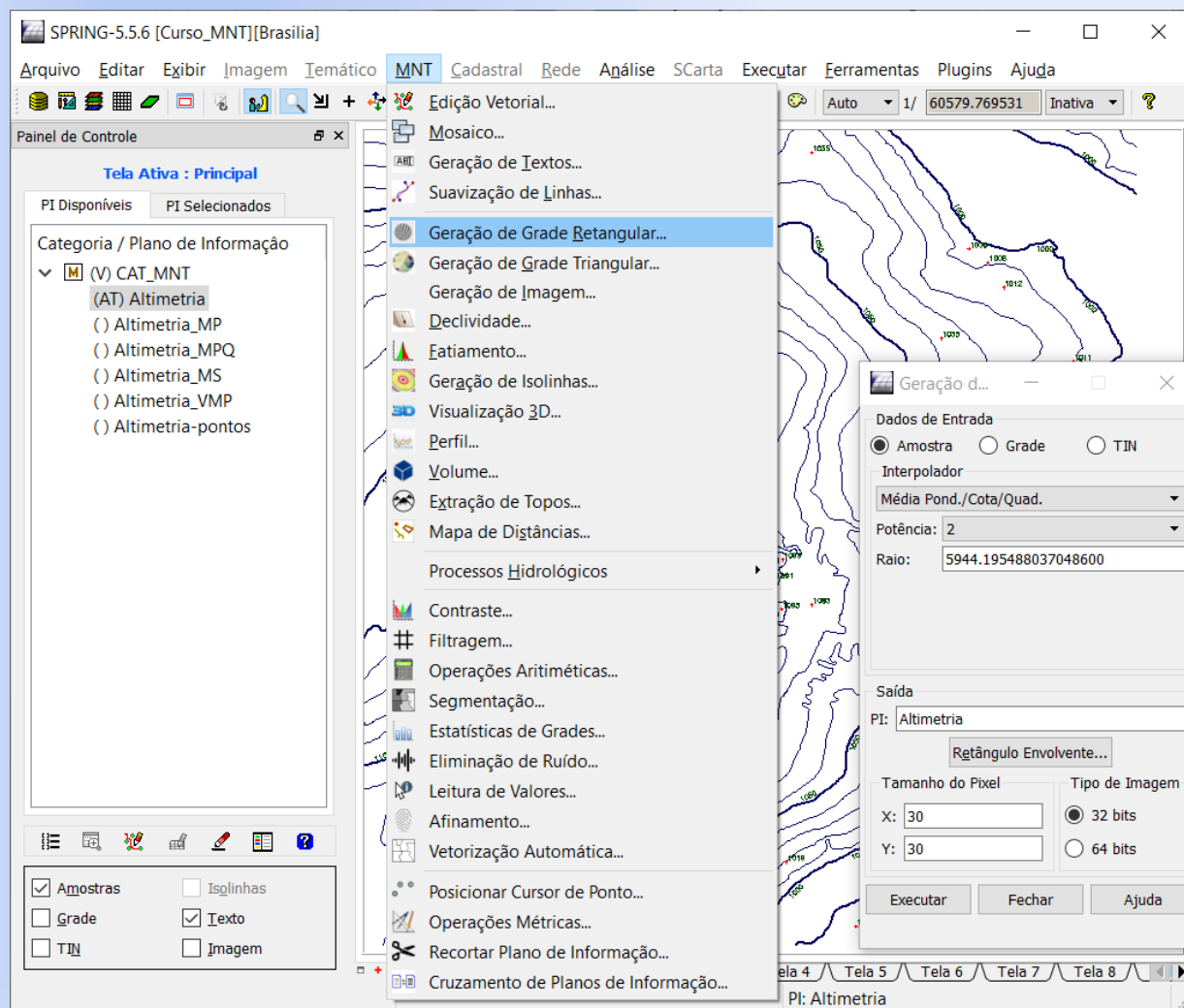


$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{\beta=1}^{n(h)} \{Z(x_{\beta}, y_{\beta}) - Z((x_{\beta}, y_{\beta}) + h)\}^2$$

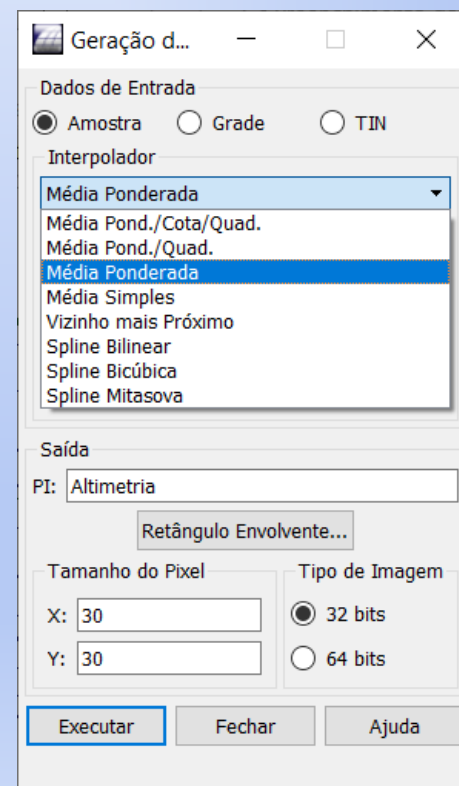


<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/curso/PyESSDAES-v11-1.zip>

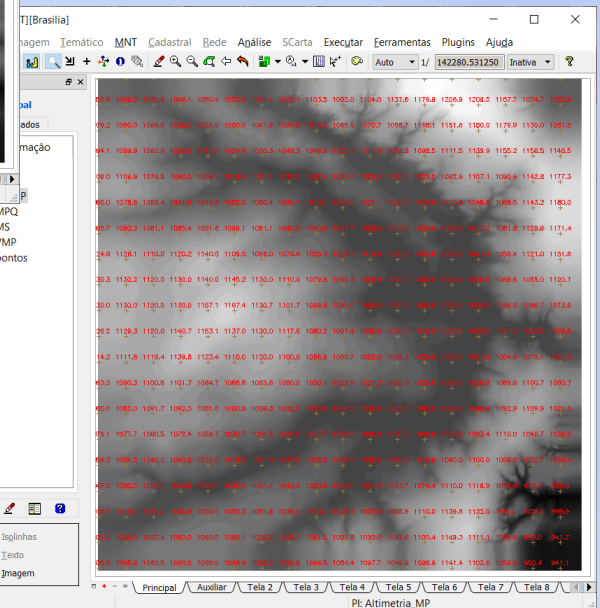
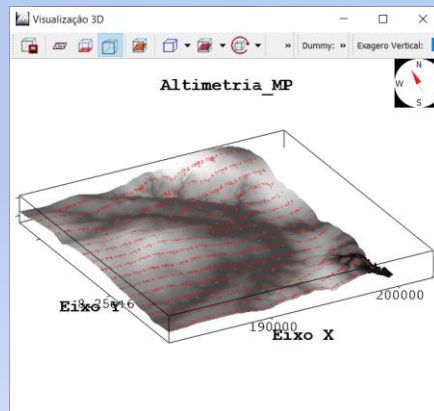
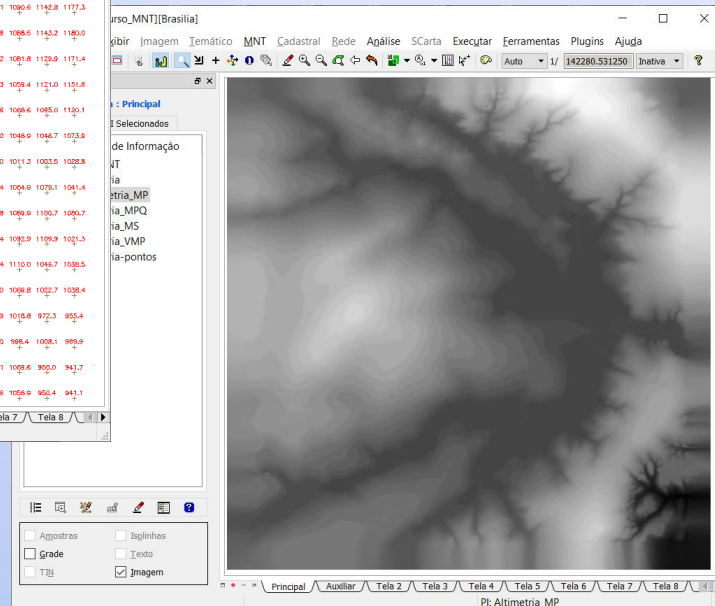
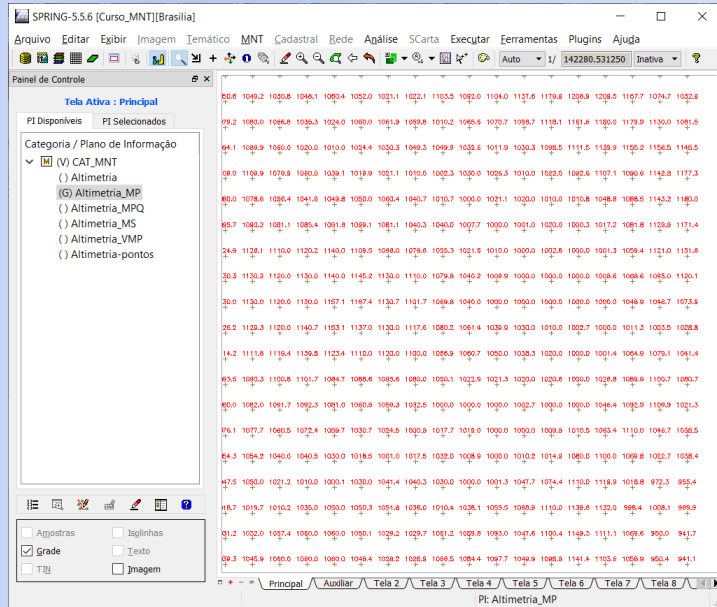
Geração de Grade Retangular (SPRING – Médias locais e patches)



**Interpoladores para
amostras pontuais e
isolinhas**

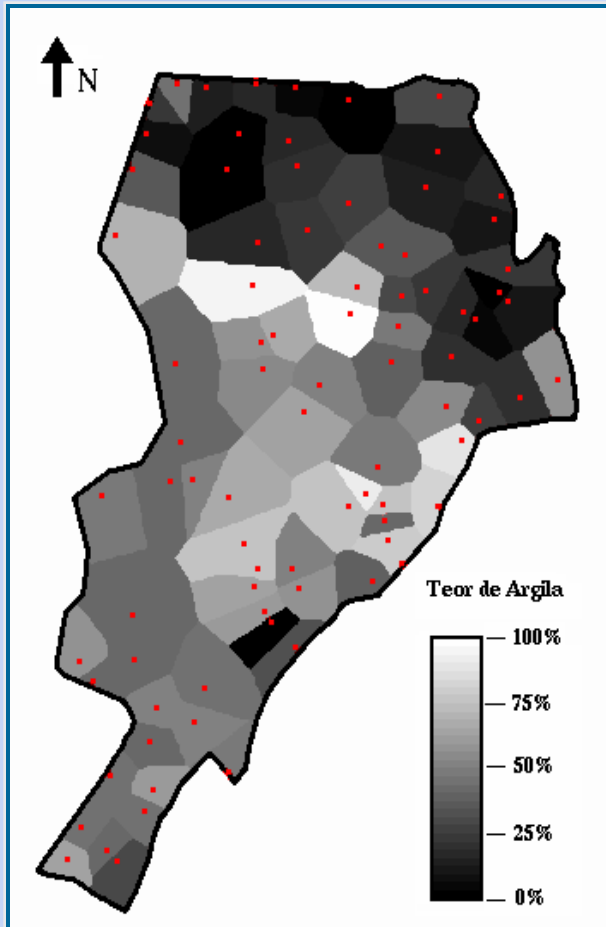


Modelagem por Grade Retangular (Representação Matricial)

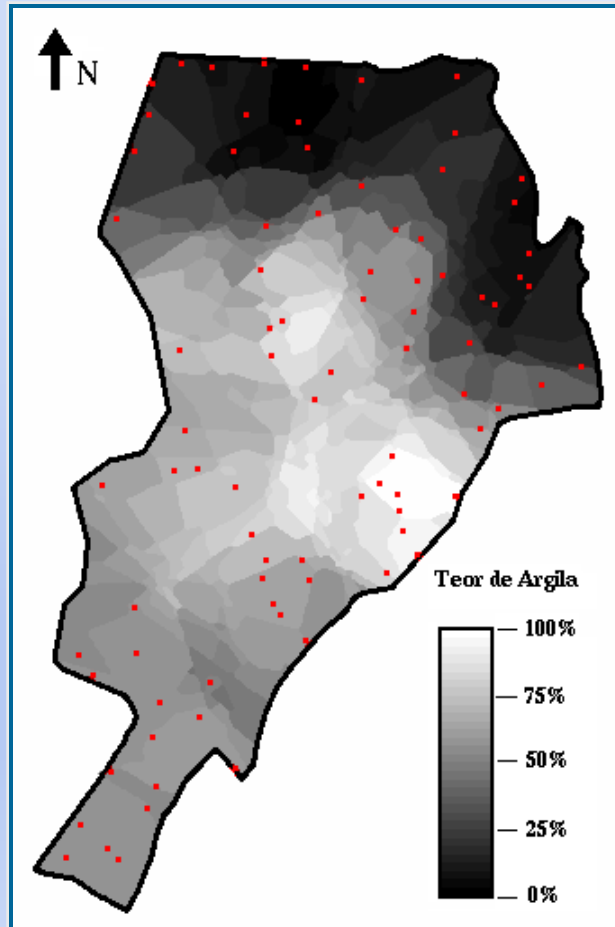


Modelagem por Grade Retangular (interpoladores)

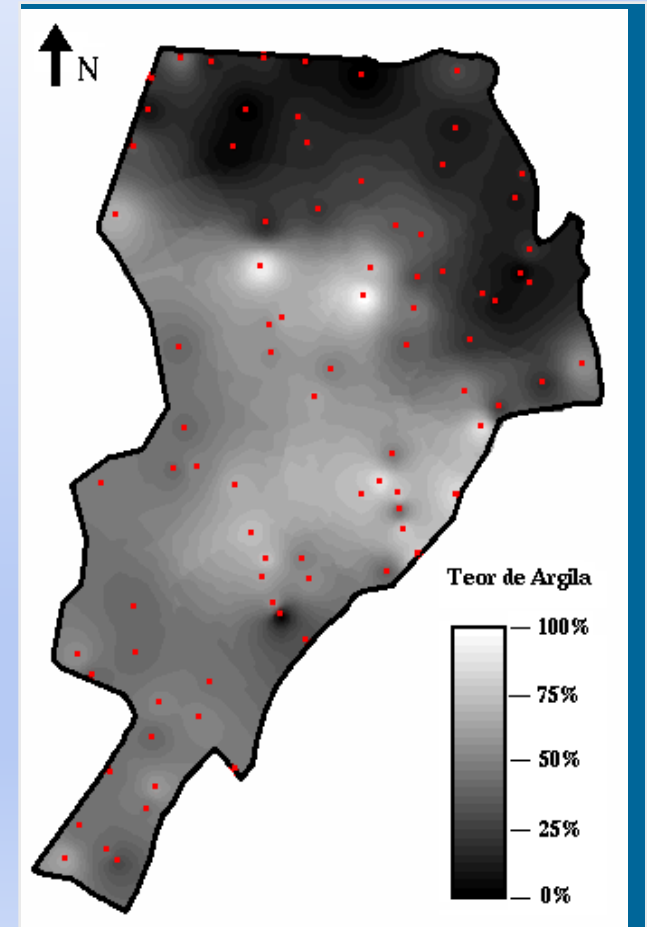
Vizinho mais próximo



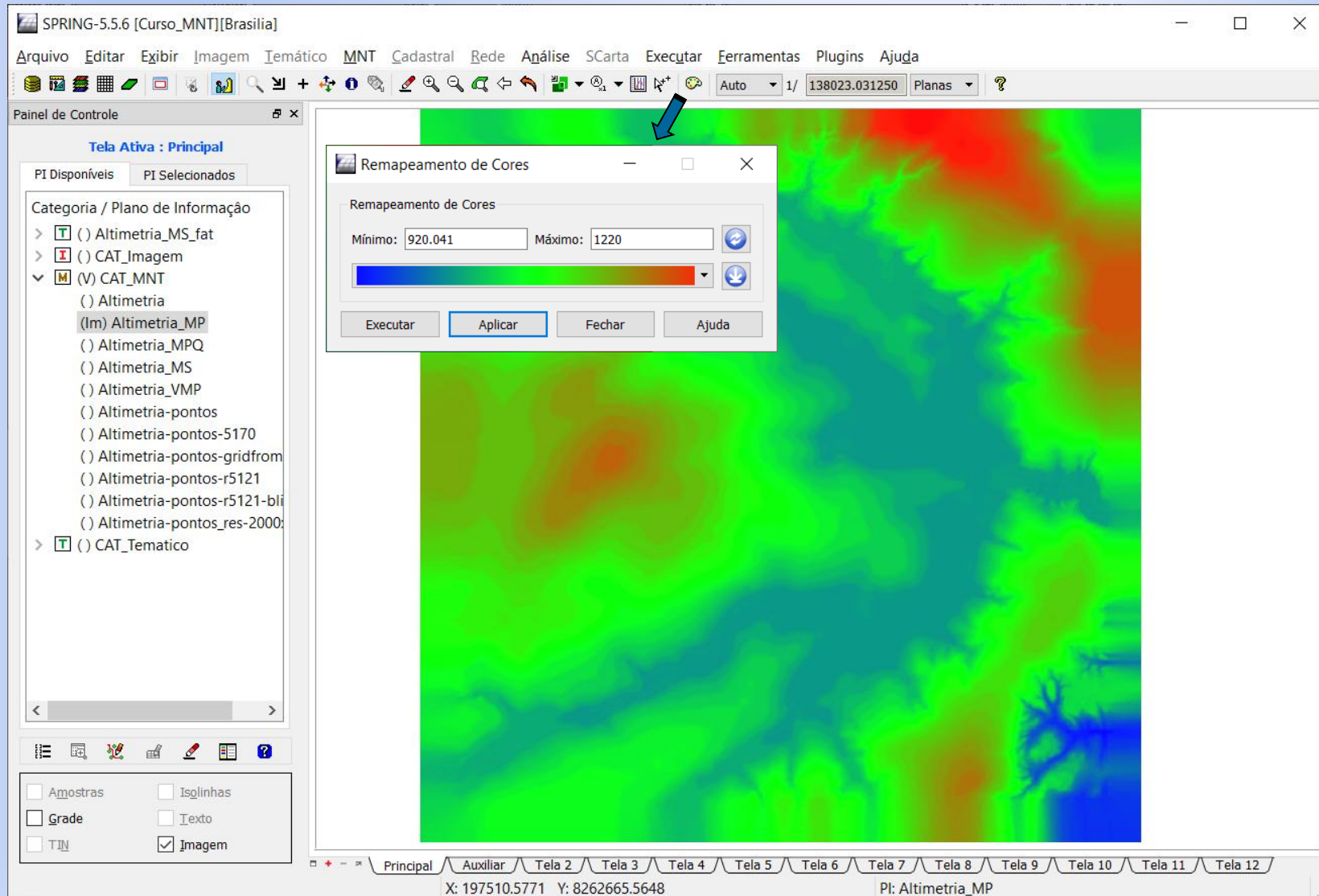
Média Simples



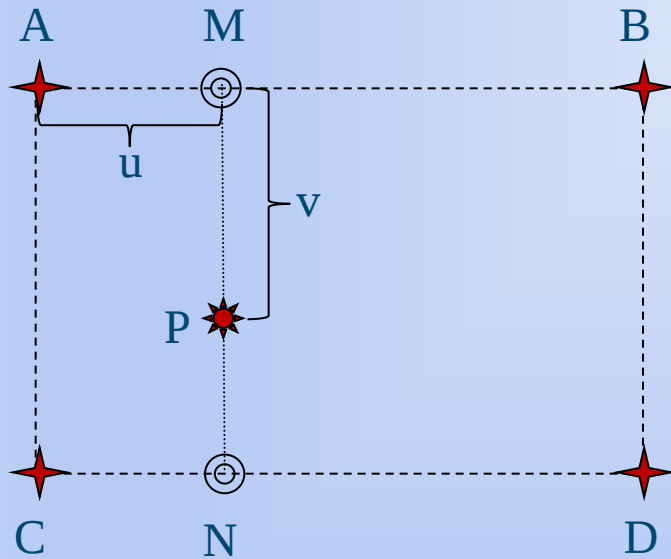
Média Ponderada



Modelagem por Grade Retangular (Visualização com LUT)



Modelagem por Grade Retangular (Grade de Grade)



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

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



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

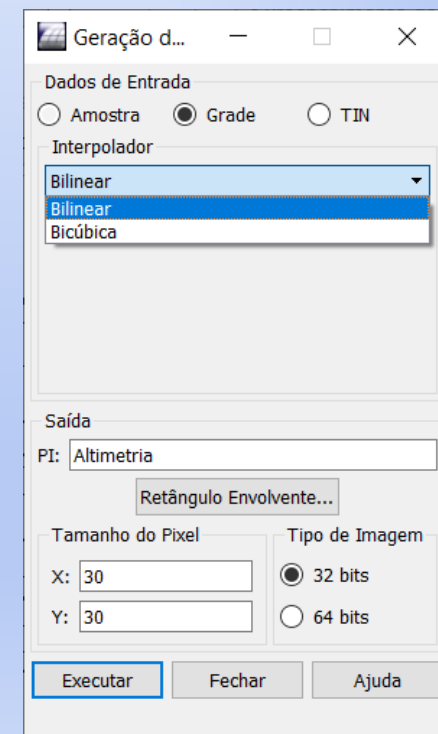
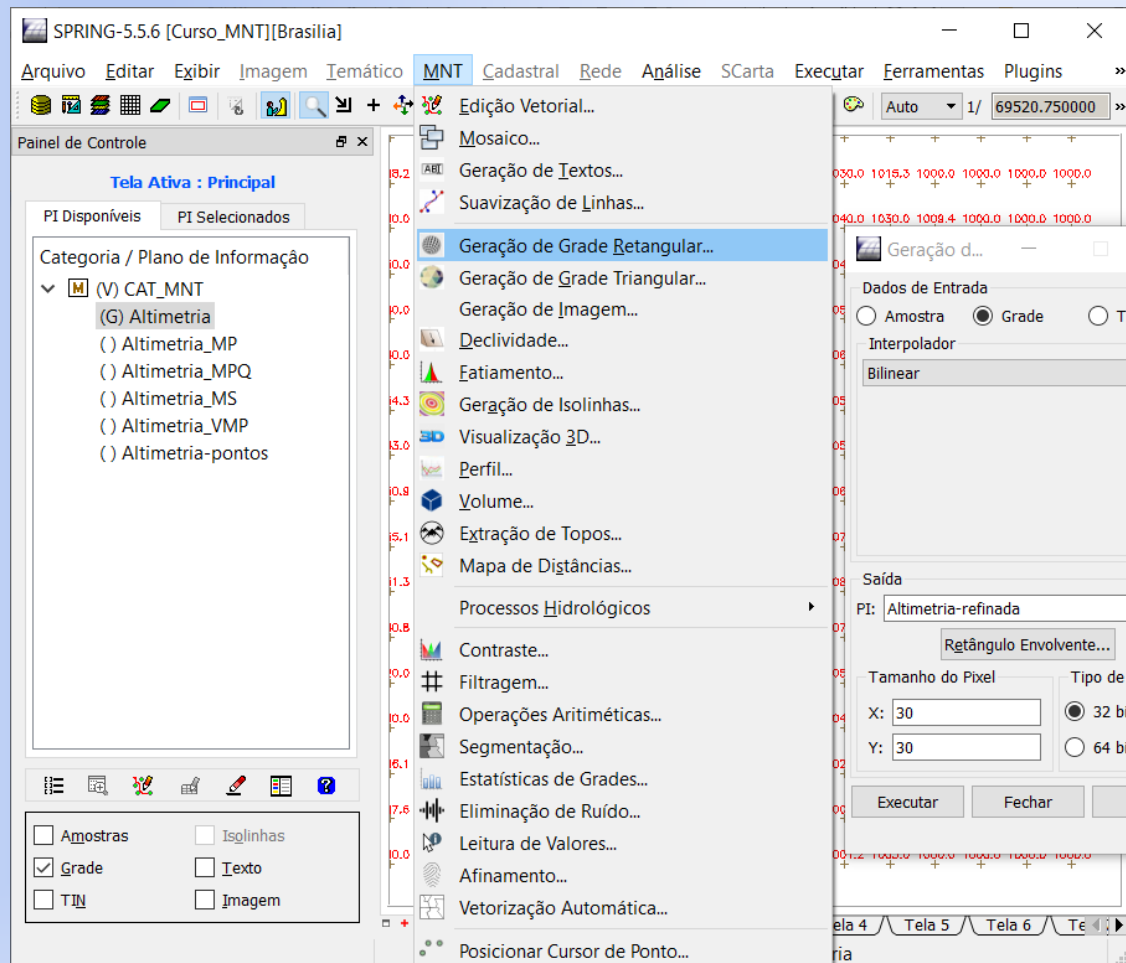
$$u, v \in [0,1]$$

Modelagem bilinear : 4 vizinhos

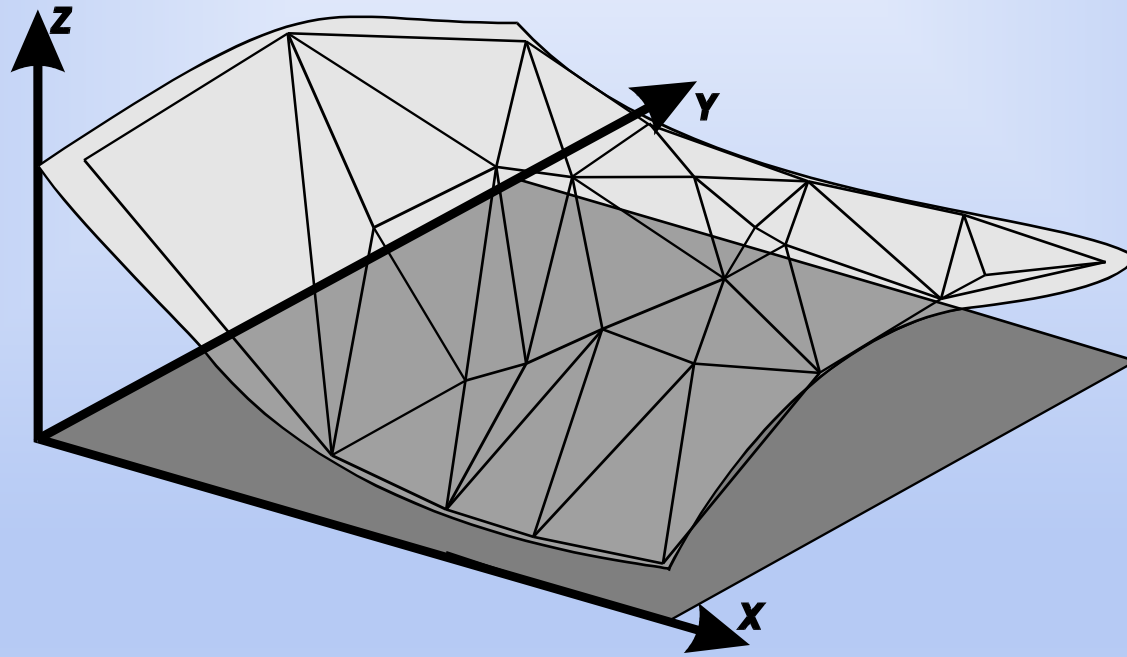
Modelagem bicúbico : 25 vizinhos

Geração de Grade Retangular (SPRING – Grade de grade)

**Interpoladores para
Grades alterar
Resolução e Retângulo
Envolvente**

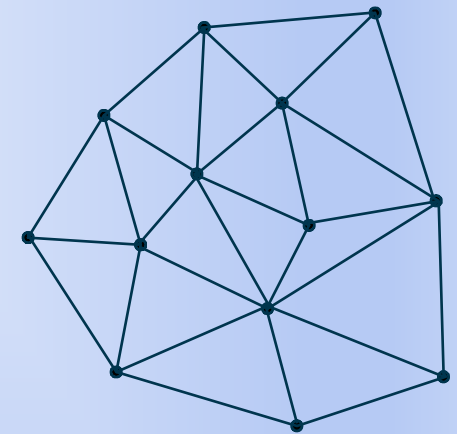


Modelagem por Grade Triangular

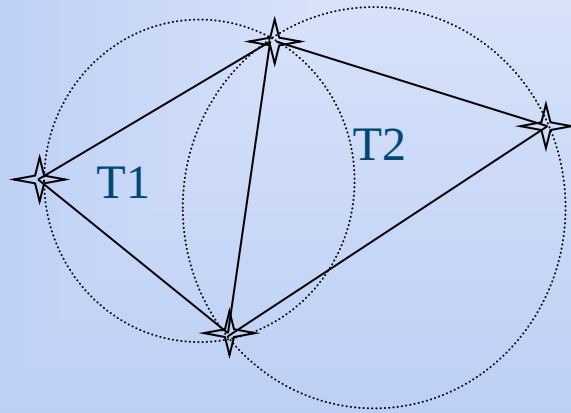


Modelagem por Grade Triangular: Conceitos

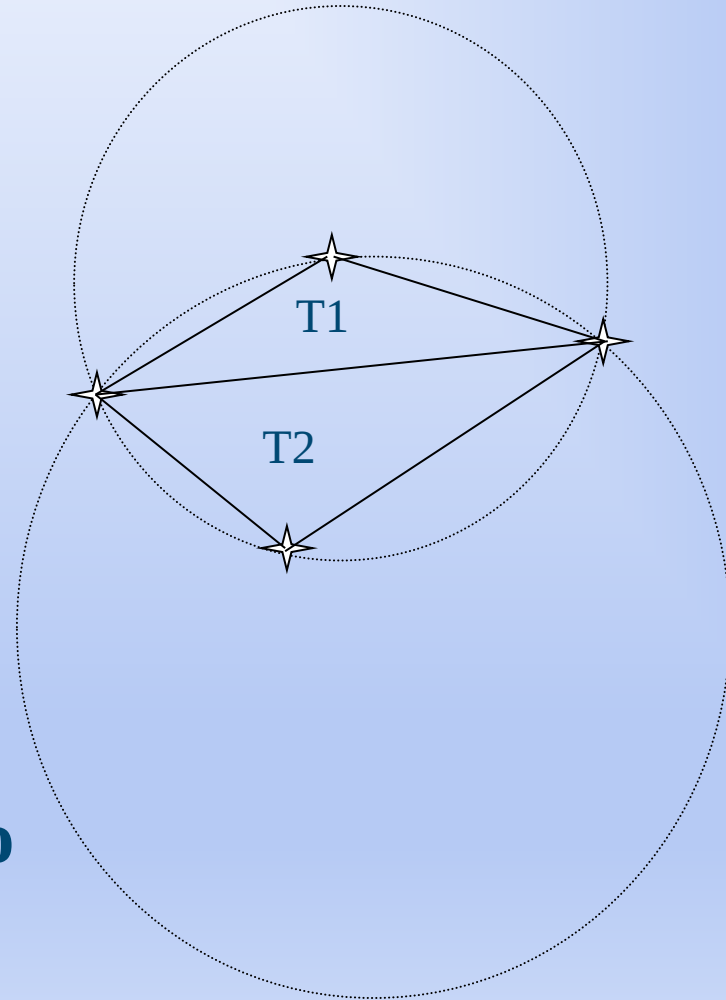
- Superfície definida por um poliedro
 - faces triangulares
 - vértices = pontos amostrados
 - triangulação não é única.
- Triangulação de Delaunay- Critério do Circumcirculo
 - “Dados os pontos p_a, p_b e $p_c \in$ Conjunto Amostral P onde $a \neq b \neq c$, uma triângulação T é dita ser de Delaunay 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 $p_d \in P / d \neq a \neq b \neq c$ ”.



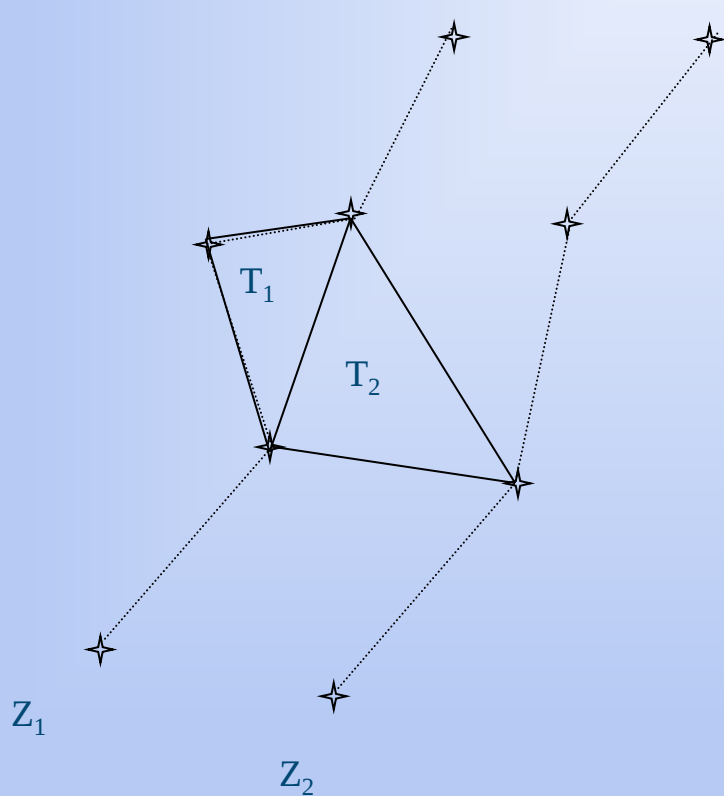
Modelagem por Grade Triangular: Triangulação de Delaunay



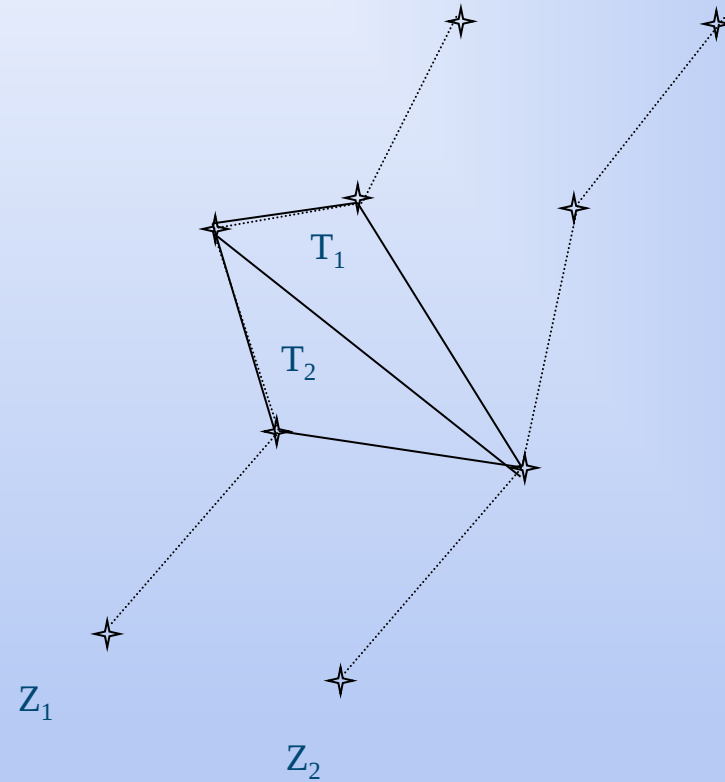
**Critério do Circumcículo
para definição da triangulação
de Delaunay.**



Modelagem por Grade Triangular: Inserção de Restrições

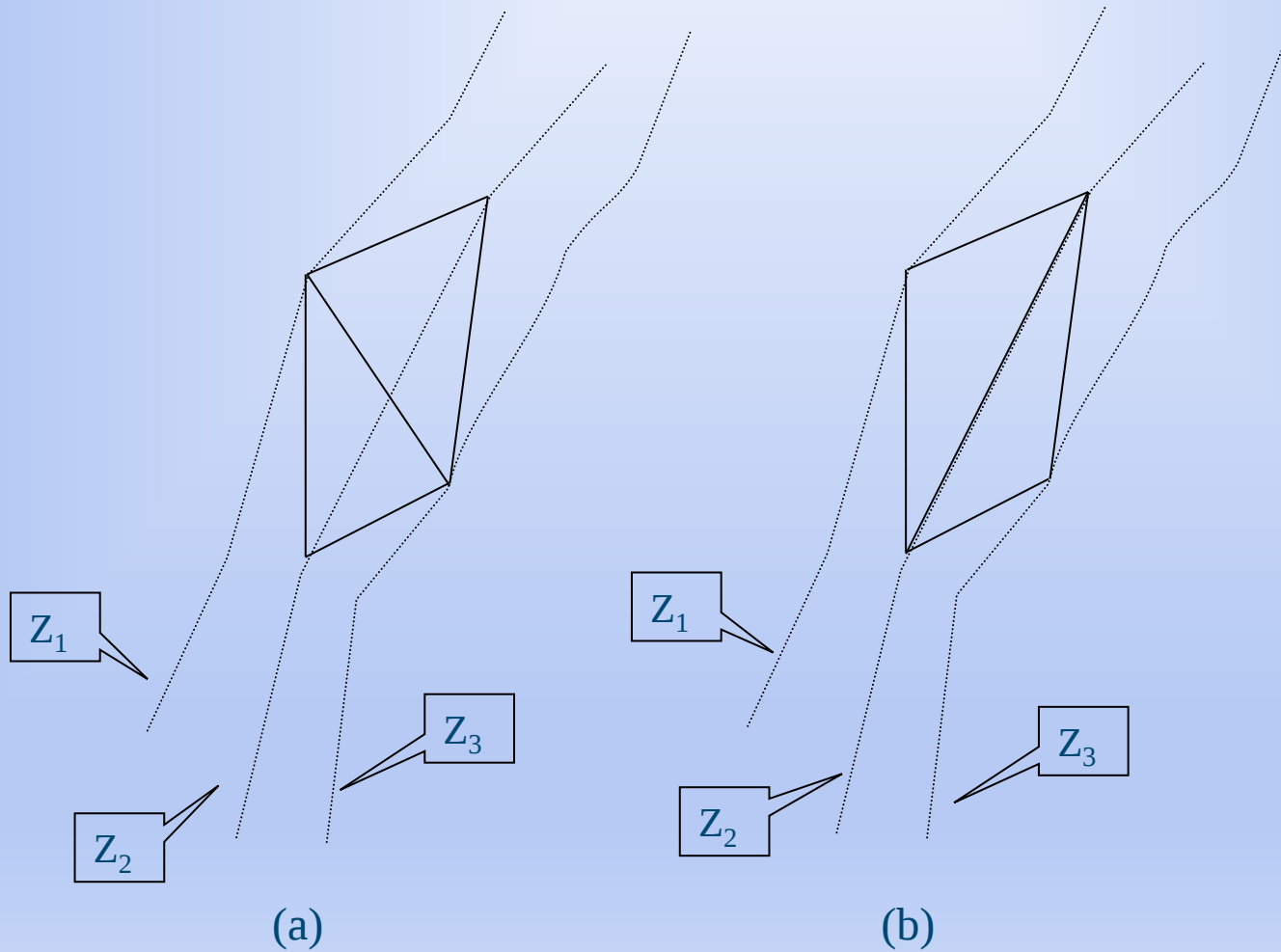


(a)

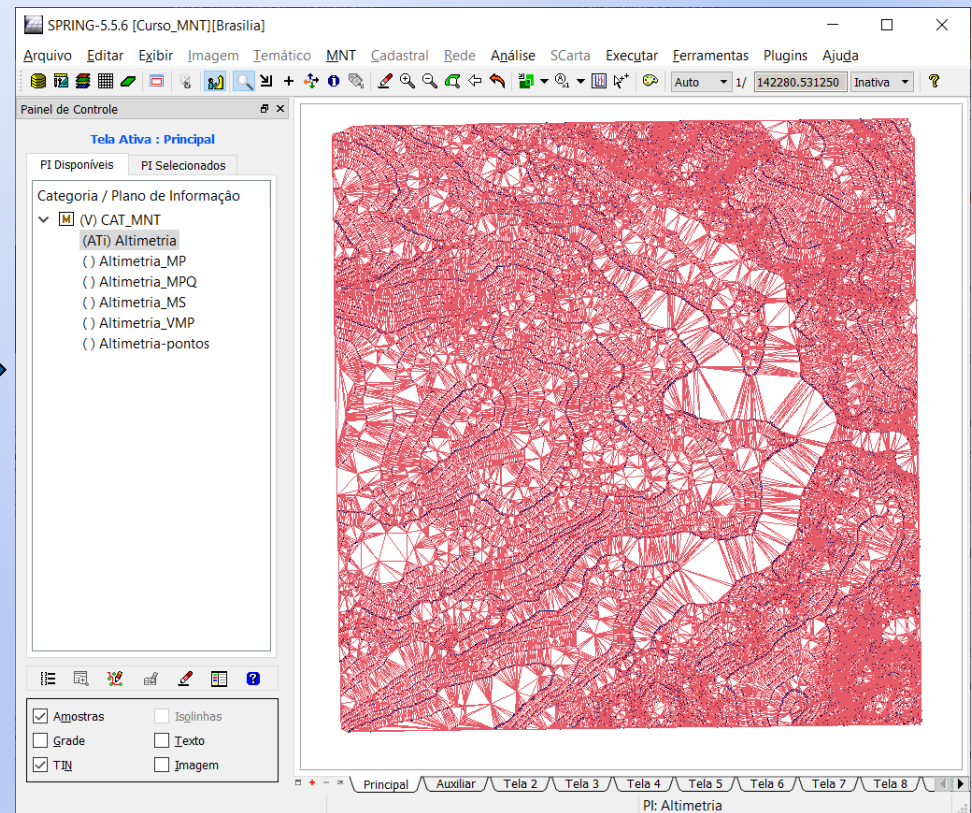
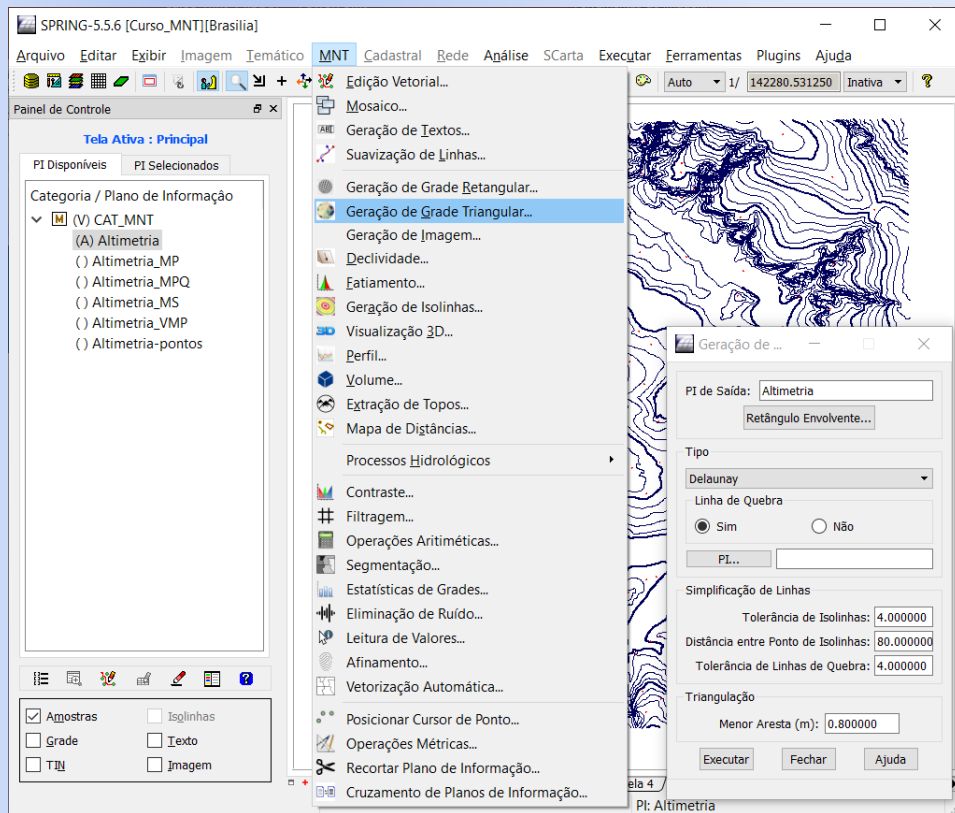


(b)

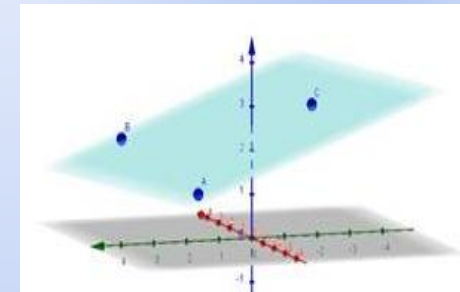
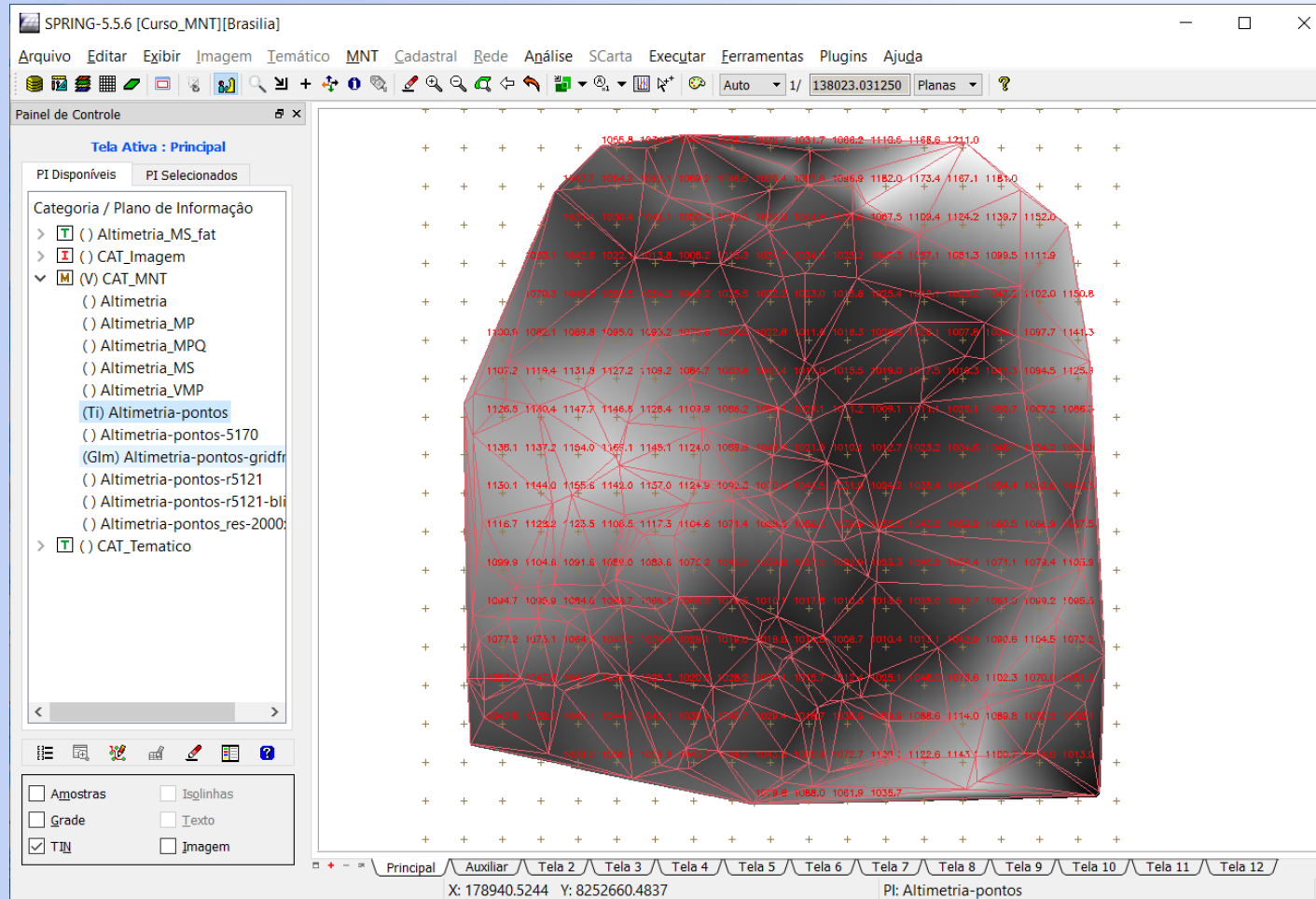
Modelagem por Grade Triangular: Inserção de Restrições



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	1. Melhor representação de relevo complexo 2. Incorporação de restrições como linhas de crista	1. Facilita manuseio e conversão 2. Adequada para geofísica e visualização 3D
Problemas	1. Complexidade de manuseio 2. Inadequada para visualização 3D	1. Representação de relevo complexo 2. Cálculo de declividade

Modelagem Numérica por Grades: Validação

SPRING-5.5.6 [Curso_MNT][Brasília]

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-gridfrom
 - () Altimetria-pontos-r5121
 - () Altimetria-pontos-r5121-bli
 - () Altimetria-pontos_res-2000
- > T () CAT_Tematico

1 → Análise → Validação...

2 → Validação...

3 → Referência...

4 → Executar

Validação

Planos de Informação

Validação... Altimetria_MP

Referência... Altimetria-pontos

Fator Amostragem: 1

Associação de Classes

Validação: [dropdown]

Referência: [dropdown]

Associar Desassociar

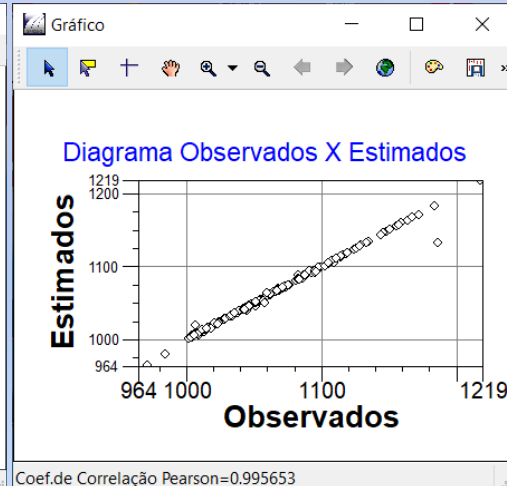
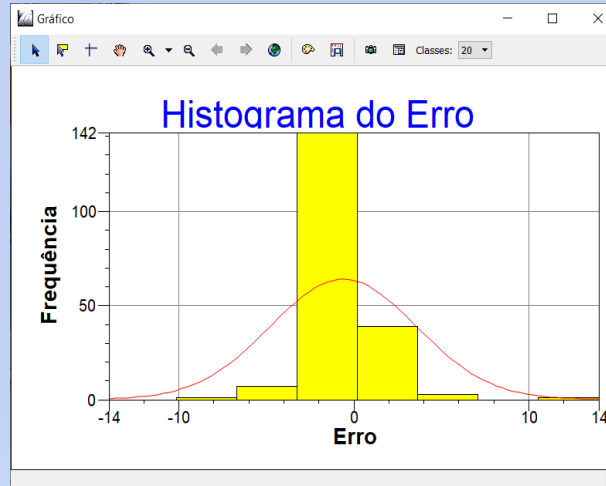
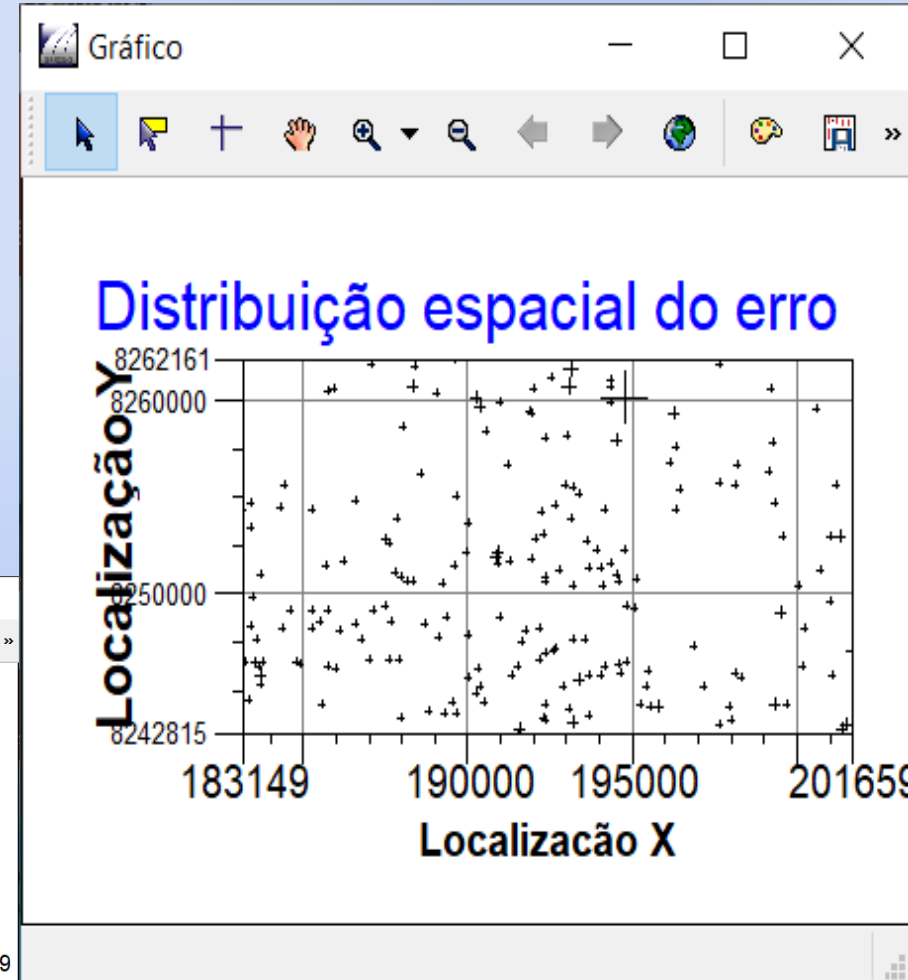
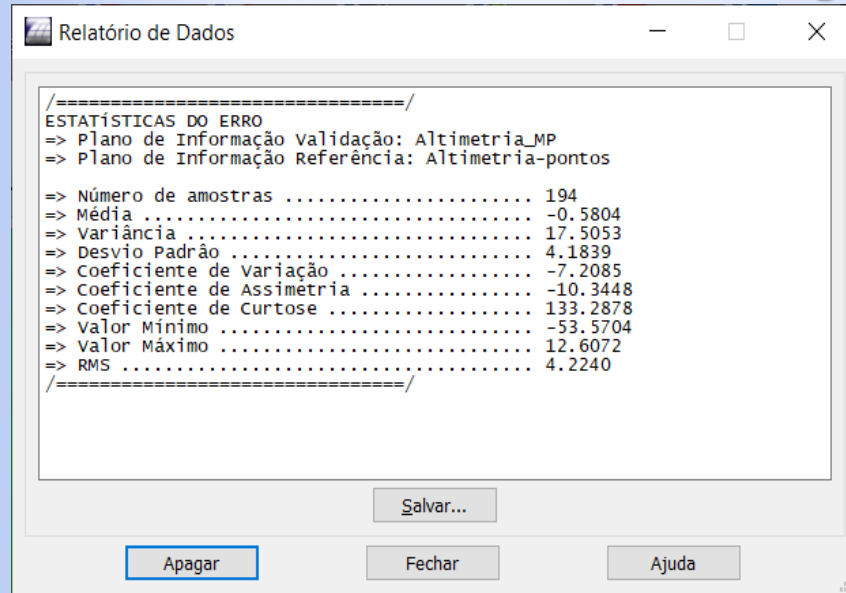
Executar Fechar Ajuda

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

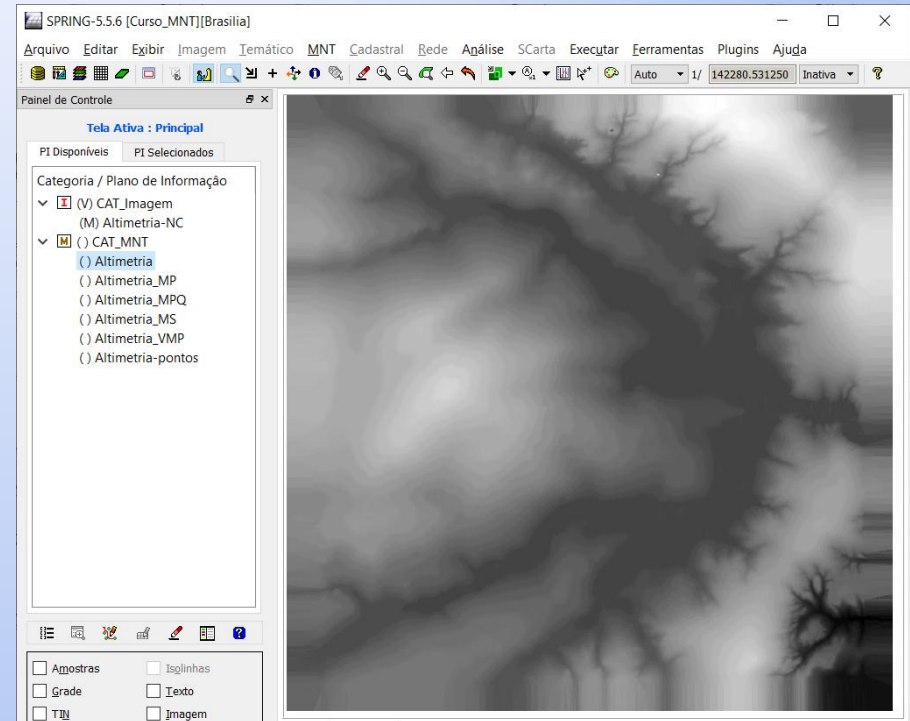
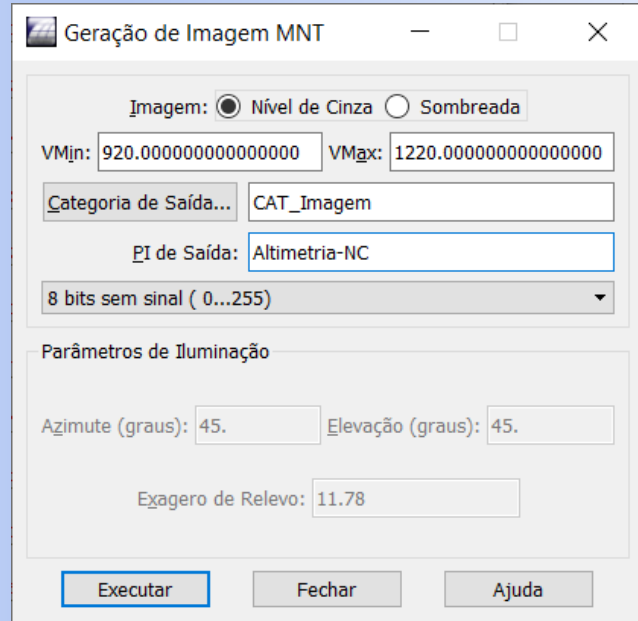
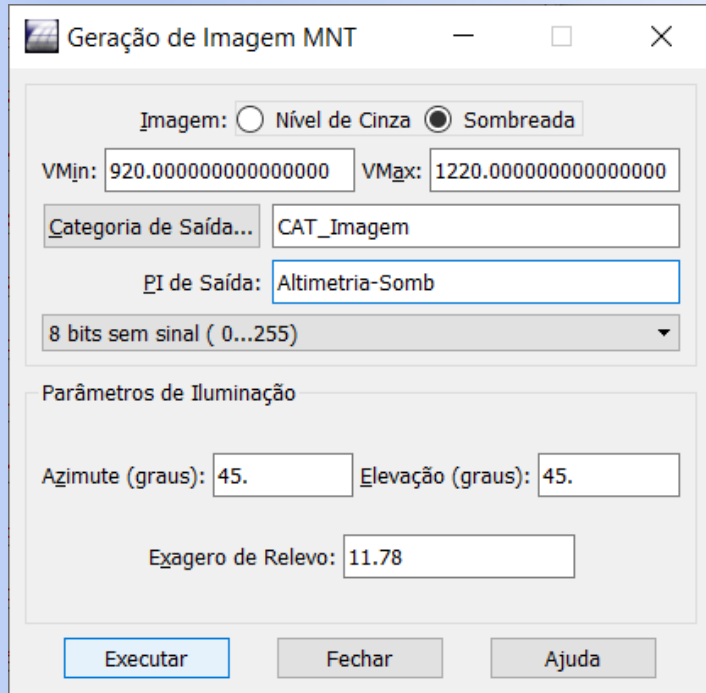


Imagem MNT Nível de Cinza – Quantização dos valores de z

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

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

Aplicações: Geração de Imagem Sombreada



Geração de Imagem MNT

Imagem: ☐ Nível de Cinza ☒ Sombreada

VMin: 920.0000000000000000 VMax: 1220.0000000000000000

Categoria de Saída... CAT_Imagem

PI de Saída: Altimetria-Somb

8 bits sem sinal (0...255)

Parâmetros de Iluminação

Azimute (graus): 45. Elevação (graus): 45.

Exagero de Relevo: 11.78

Executar Fechar Ajuda

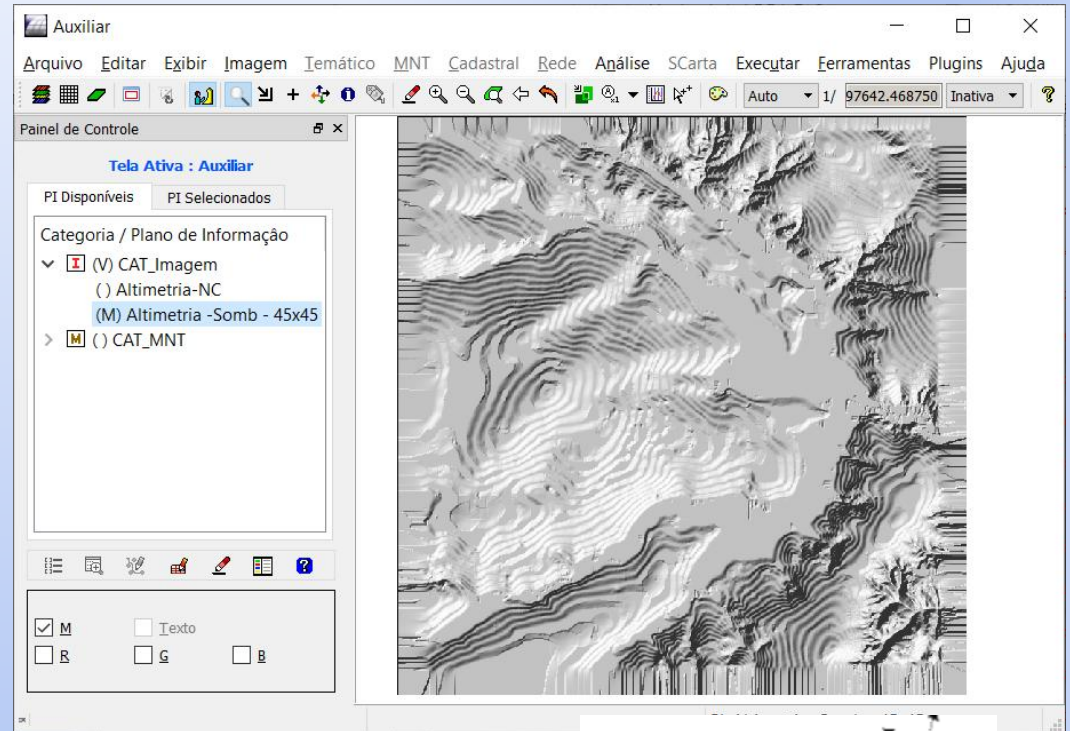
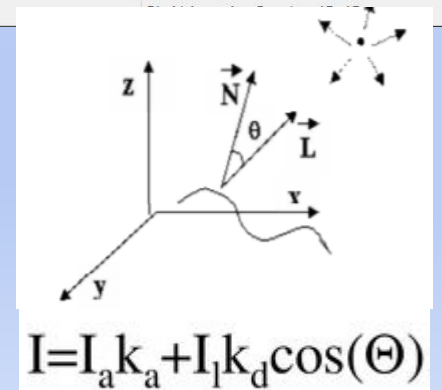


Imagem MNT Sombreada

- Níveis de cinza de saída variam com o cosseno do ângulo entre o vetor de iluminação L e o vetor normal a superfície N (Modelo Lambertiano).



Aplicações: Geração de Imagem

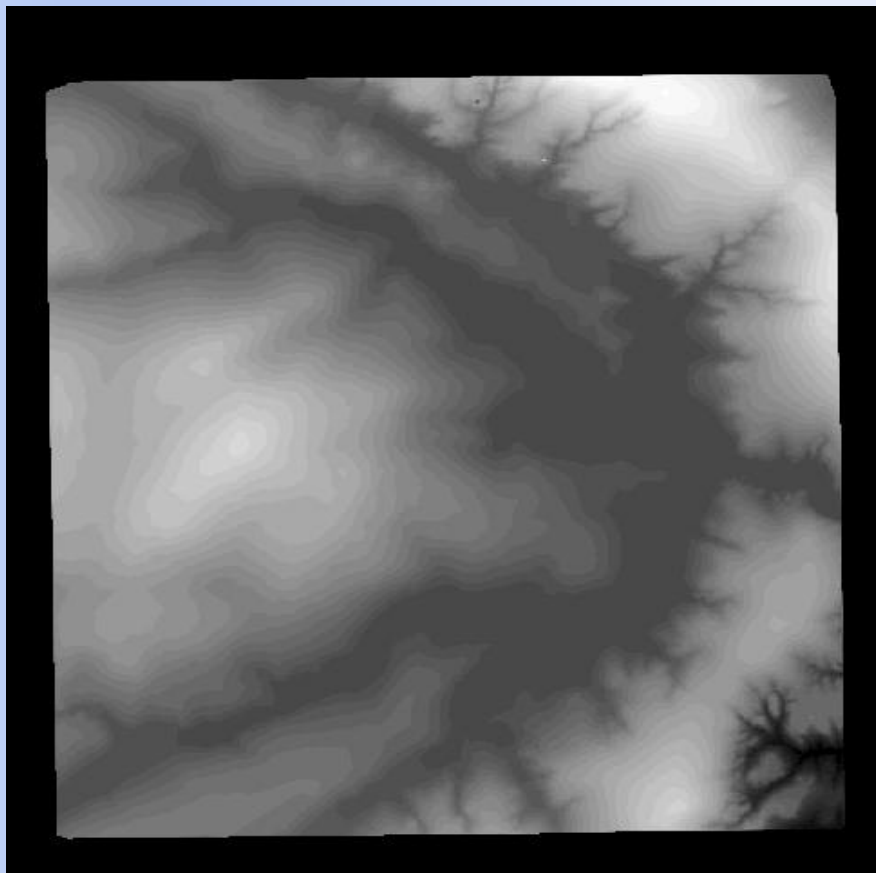


Imagem em Nível de Cinza

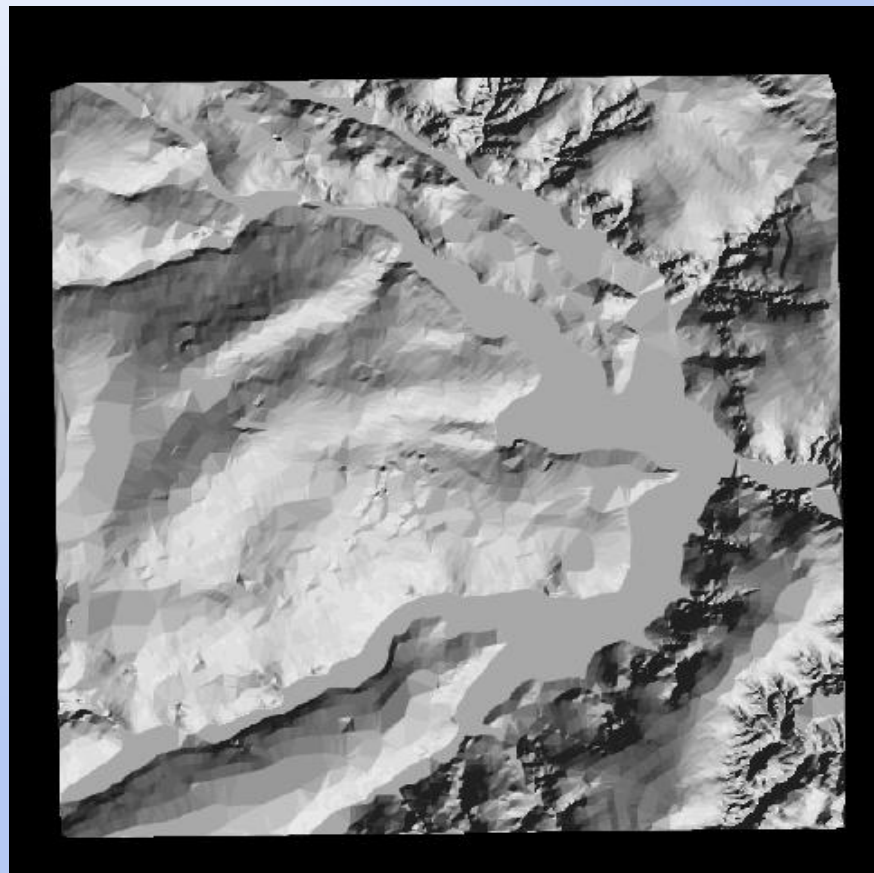
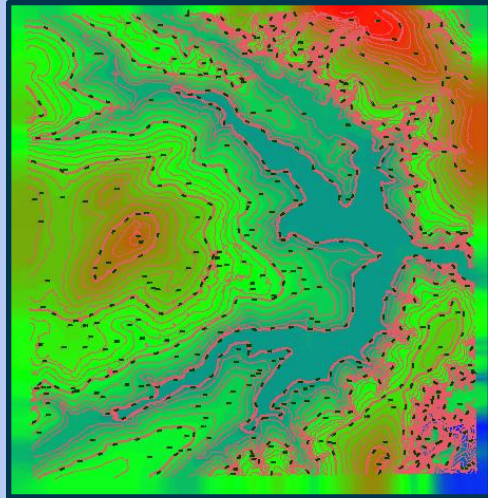


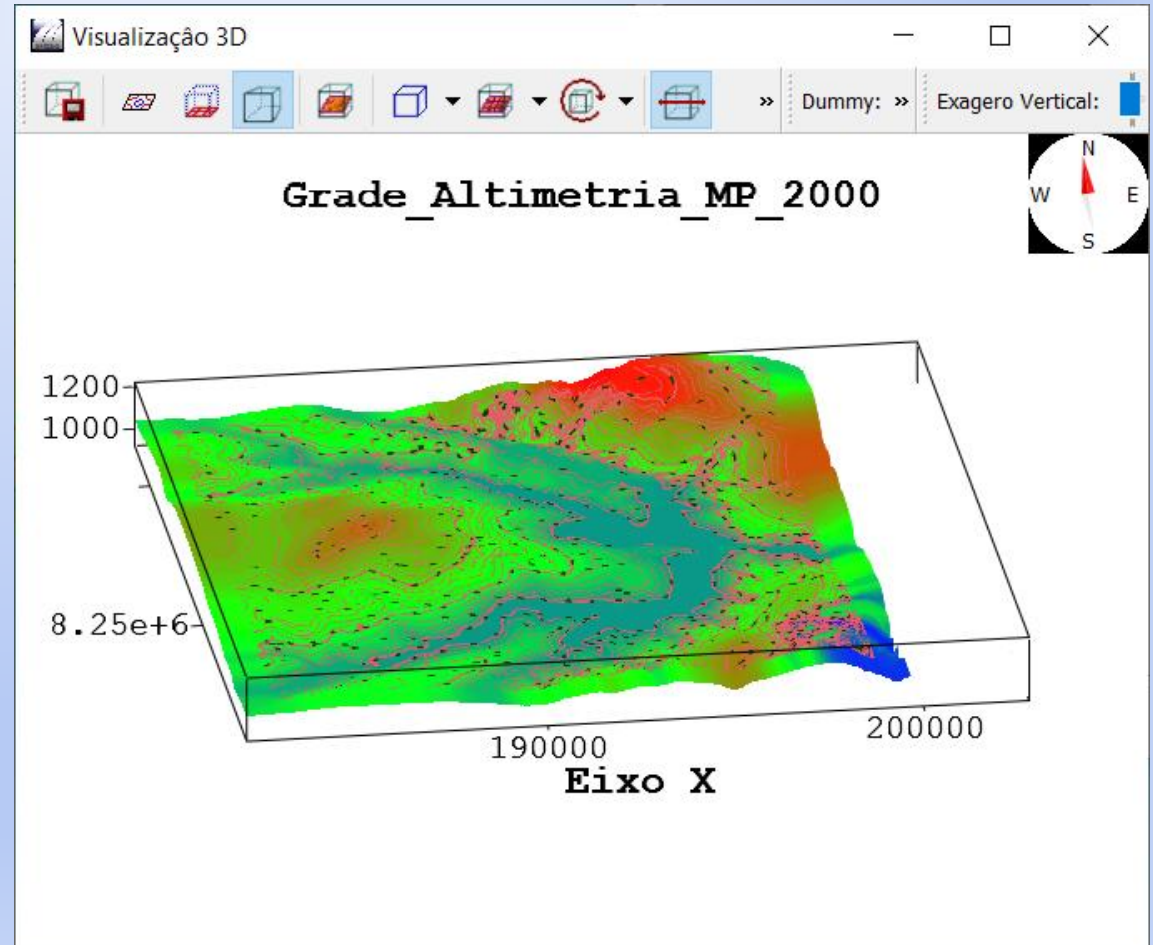
Imagem Sombreada

Aplicações

Projeção Geométrica Planar



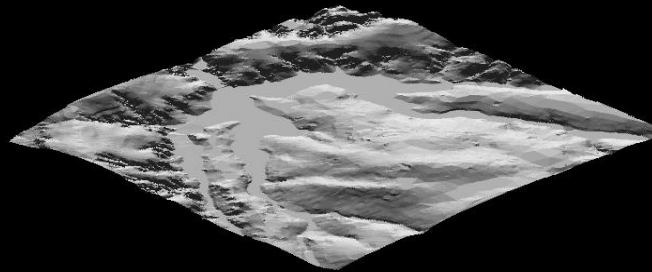
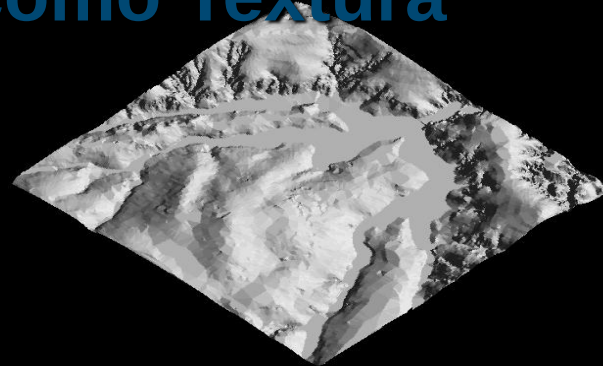
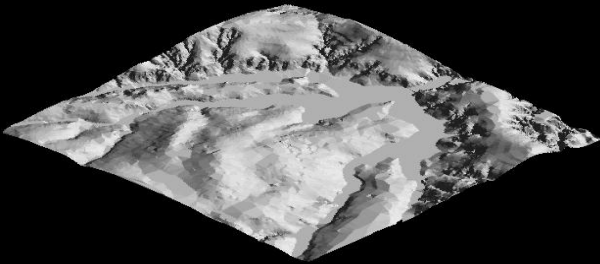
Modelo Digital de Terreno 3D, representado por uma grade regular, é projetado no plano 2D juntamente com uma imagem de textura (imagem sombreada ou imagem de sensoriamento remoto).



Aplicações

Projeção Geométrica Planar

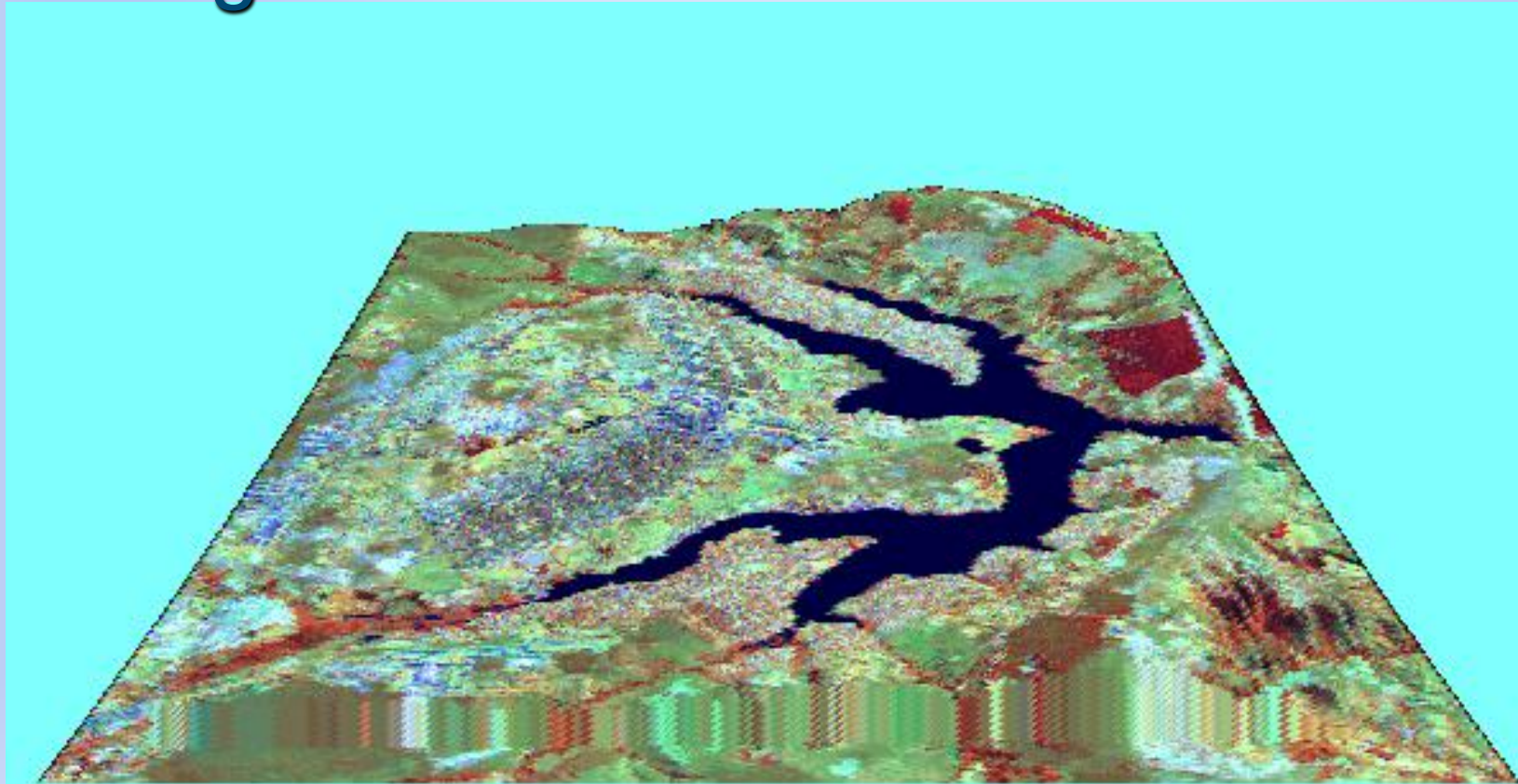
Projeção Paralela com Imagem
Sombreada como Textura



Aplicações:

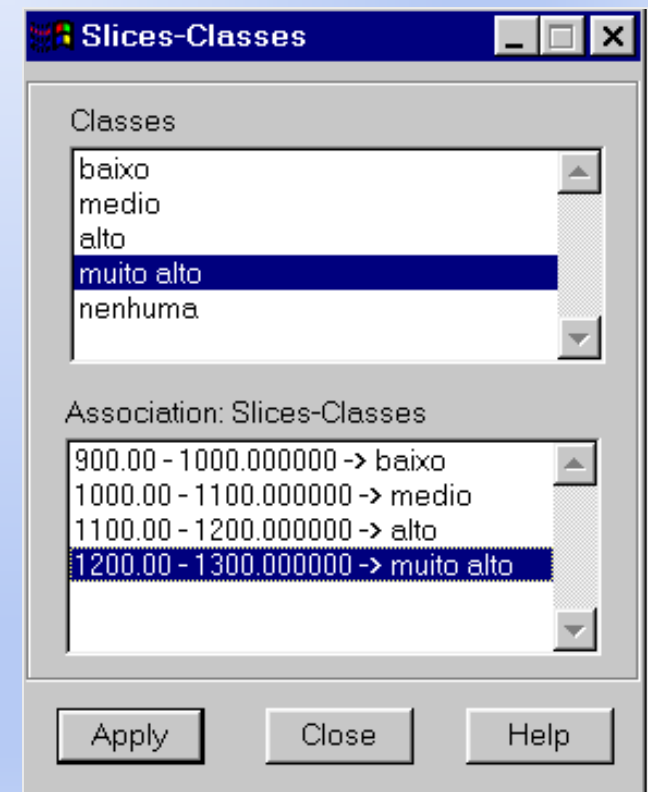
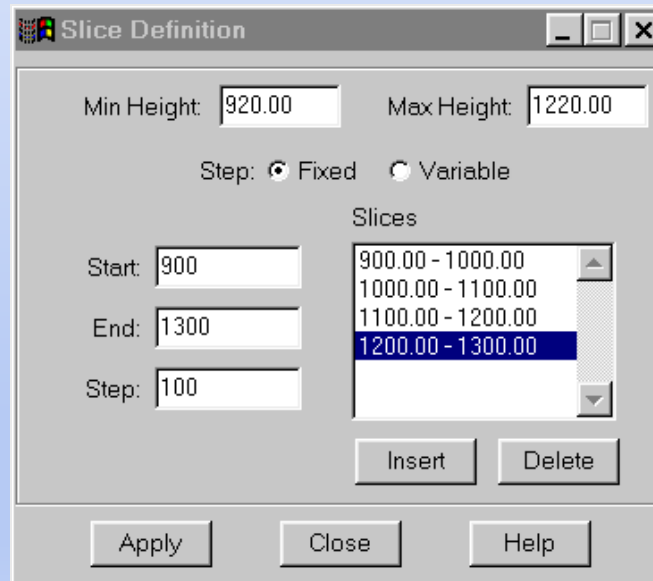
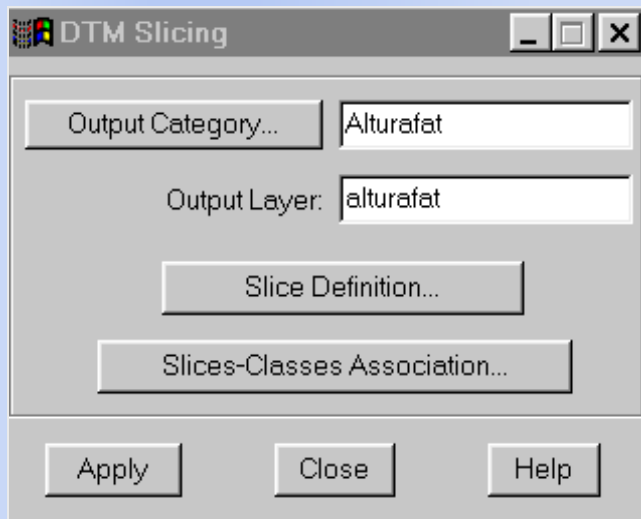
Projeção Geométrica Planar

Projeção Perspectiva do Modelo com Imagem de Sensoriamento Remoto

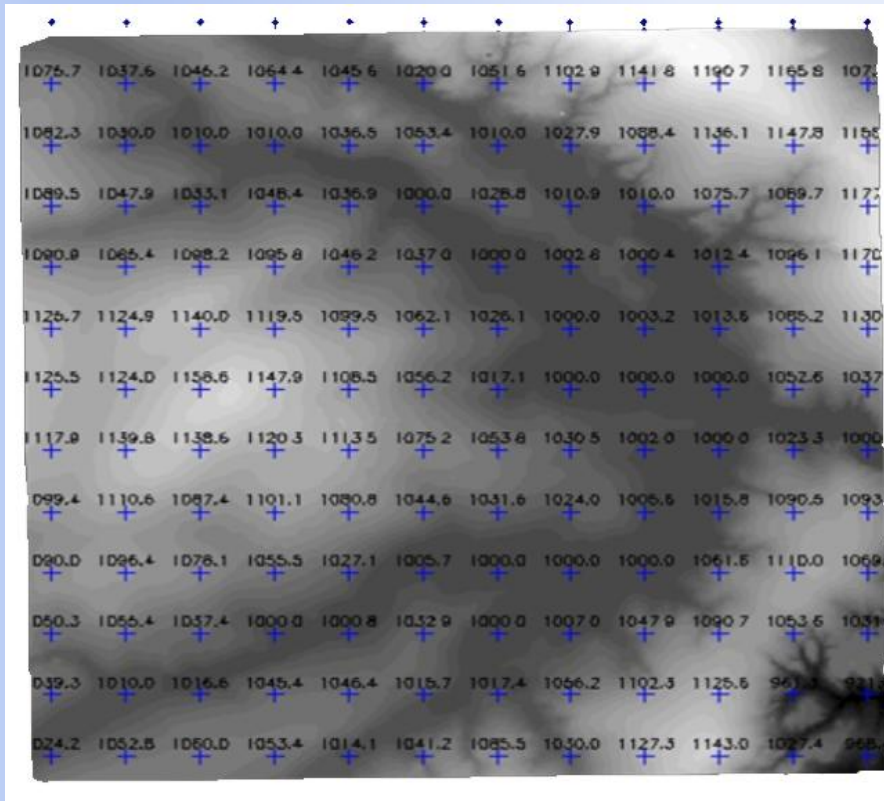


Aplicações: Fatiamento

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

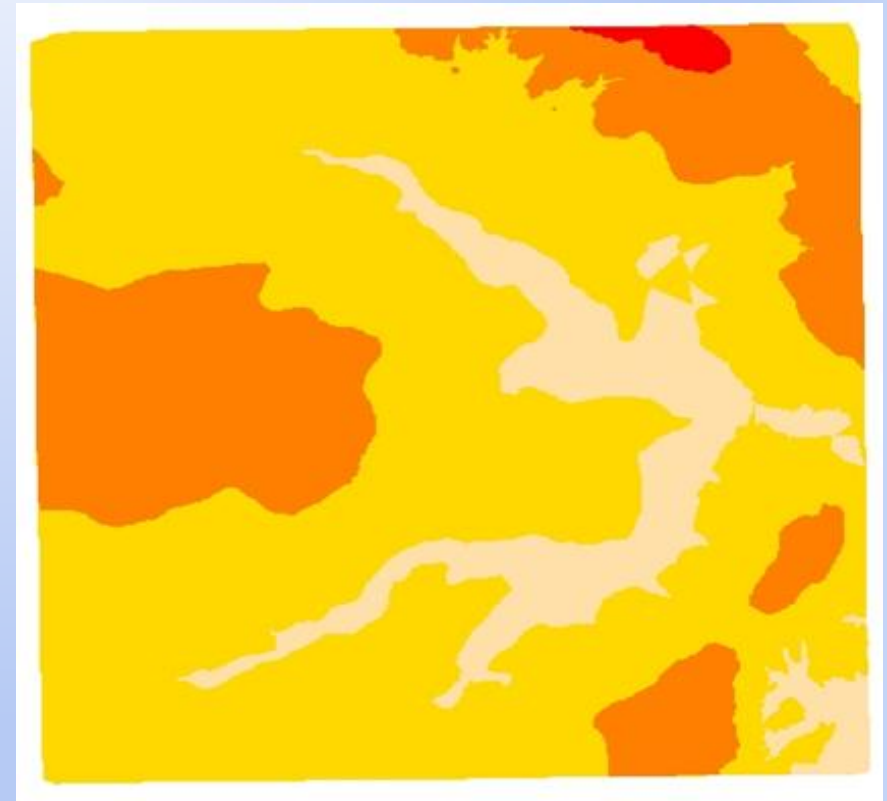


Imagem de Alturas Fatiada
(920-1000-1100-1200-1220)

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

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

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

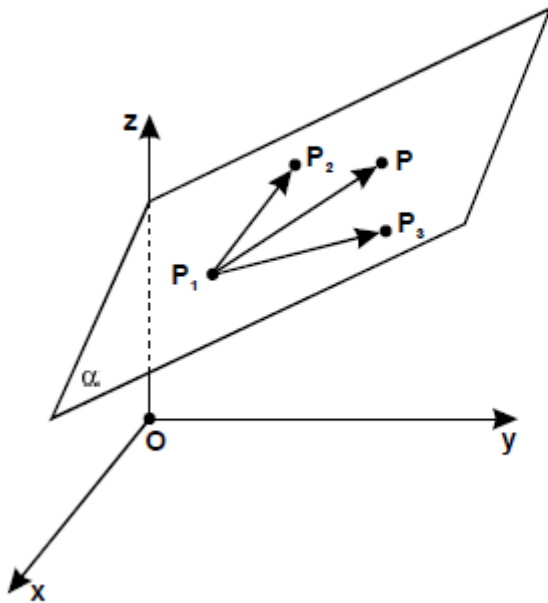
$Z_{i-1,j+1}$	$Z_{i,j+1}$	$Z_{i+1,j+1}$
$Z_{i-1,j}$	$Z_{i,j}$	$Z_{i+1,j}$
$Z_{i-1,j-1}$	$Z_{i,j-1}$	$Z_{i+1,j-1}$

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 α é determinado pelos pontos P_1 , P_2 e P_3 . Um ponto genérico $P = (x, y, z)$ pertence ao plano α 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	3.898	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	1.989	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

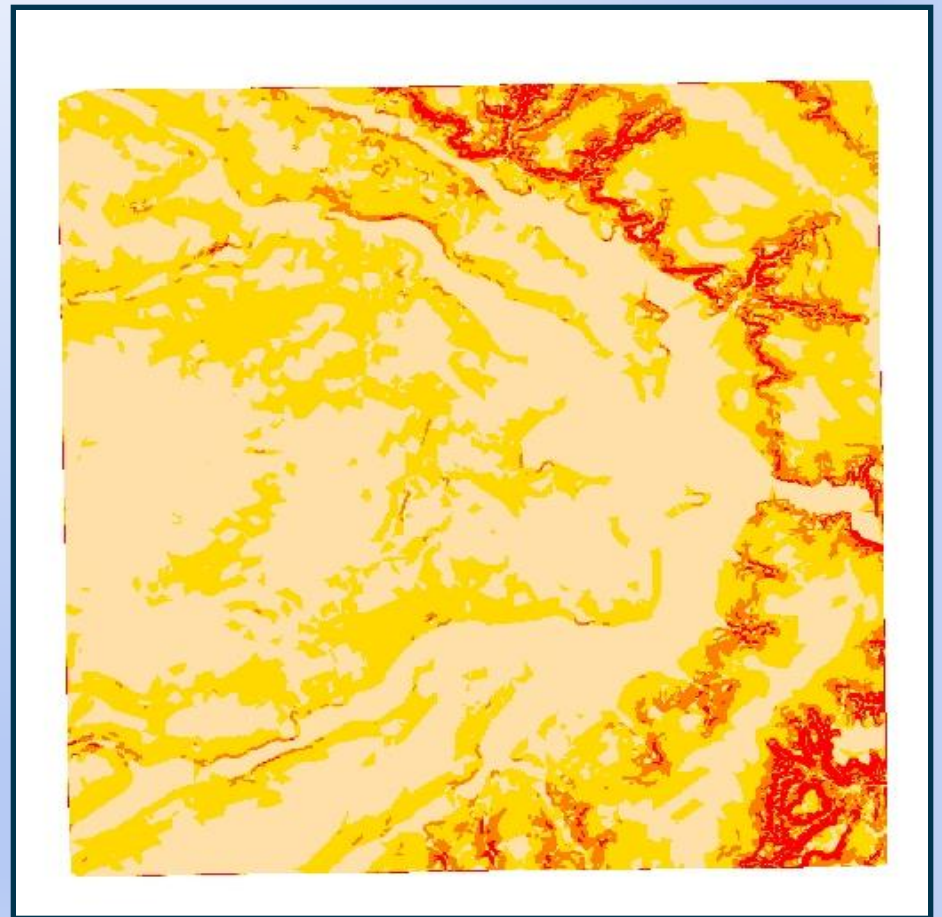


Imagem de declividade fatiada
(0-2, 2-5, 5-10 e >10)

Aplicações: Análise de Perfis

Profile

Input: ☒ Grid ☐ TIN

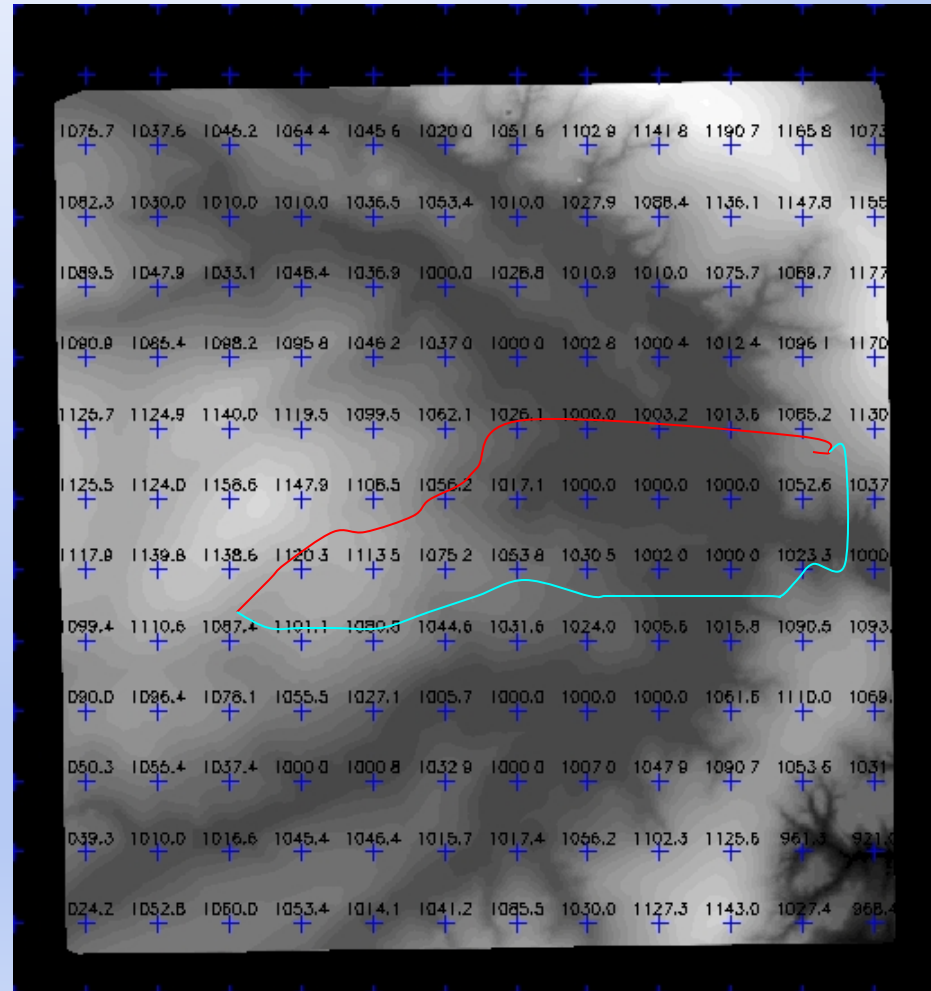
Trajectory: ☒ Editor ☐ Layer

Lines: ☒ Create ☐ Delete

Points: ☐ Create ☐ Move ☐ Delete

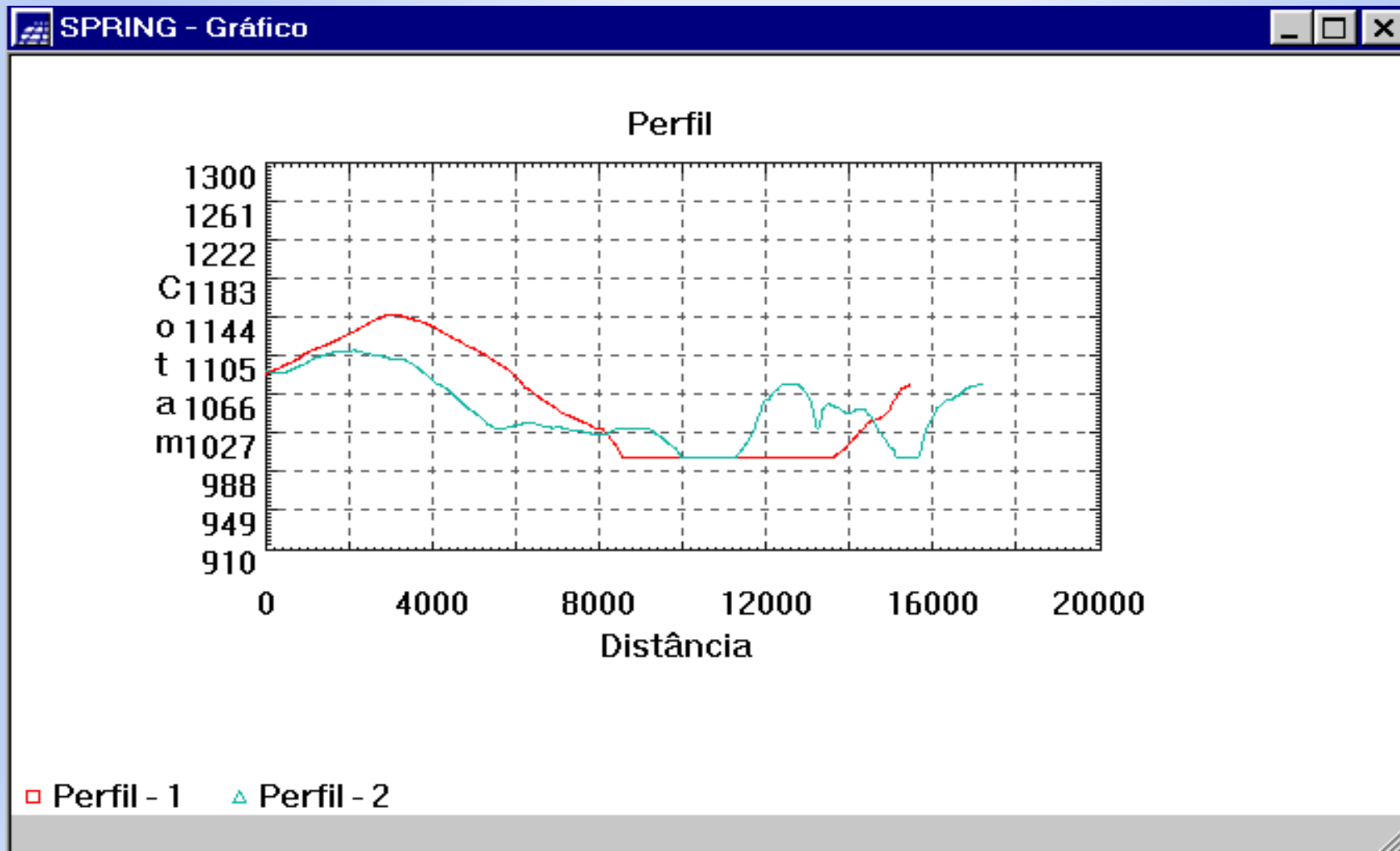
Graphic Title:

Y Axis: Unit:

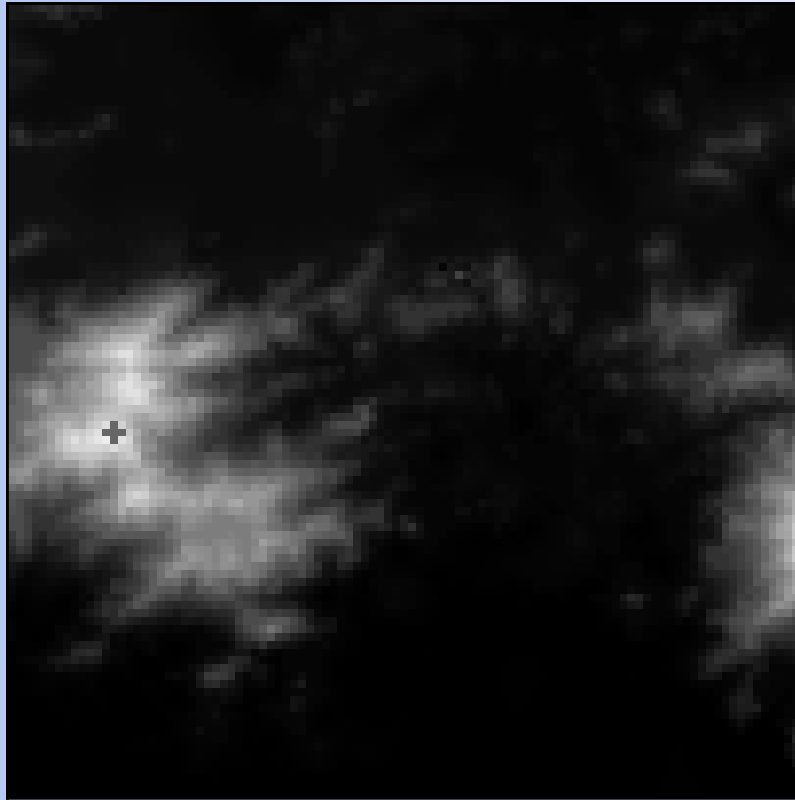


Determinação das trajetórias

Aplicações: Análise de Perfis



Aplicações: Mapas de Visibilidade

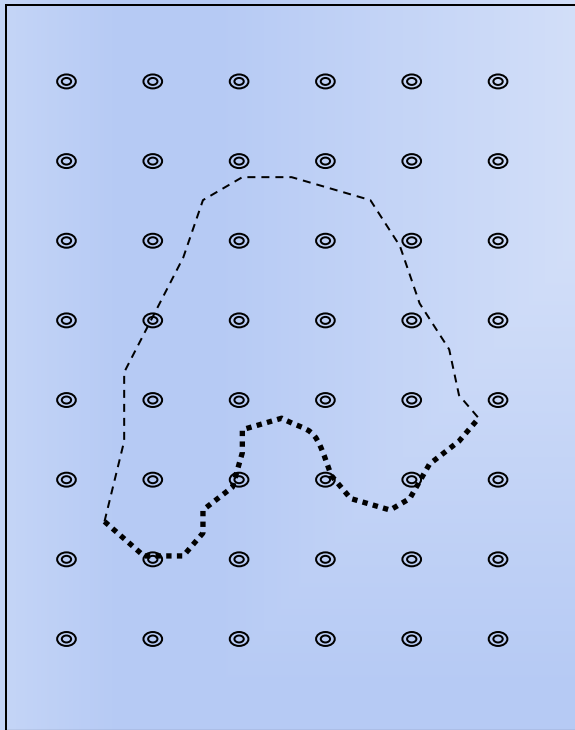


Modelo de Grade Regular



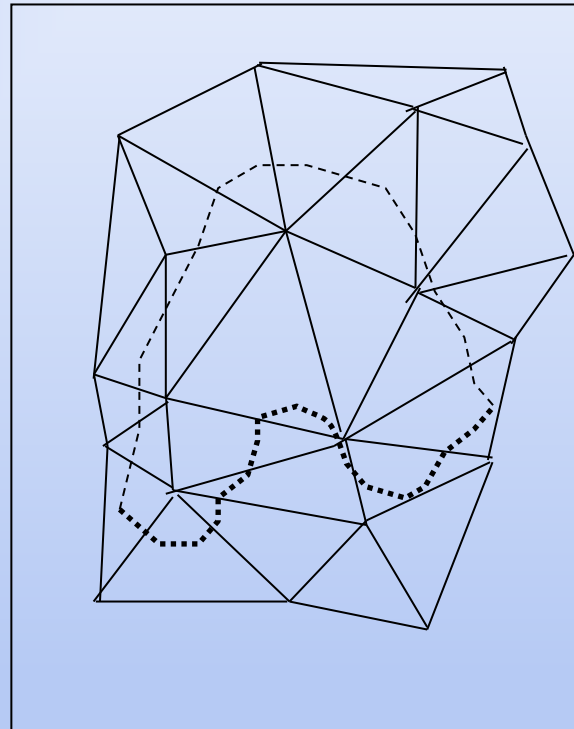
Mapa de visibilidade

Aplicações: Mapas de isolinhas



(a)

Grade Regular



(b)

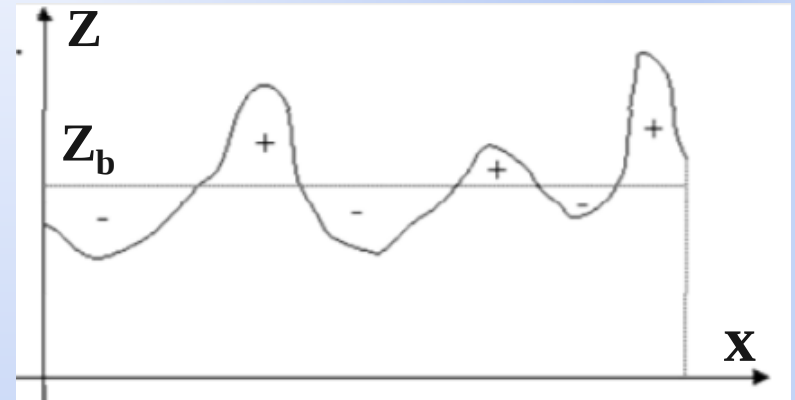
Malha triangular

**Interpolações nas
arestas das células
retangulares ou
triangulares.**

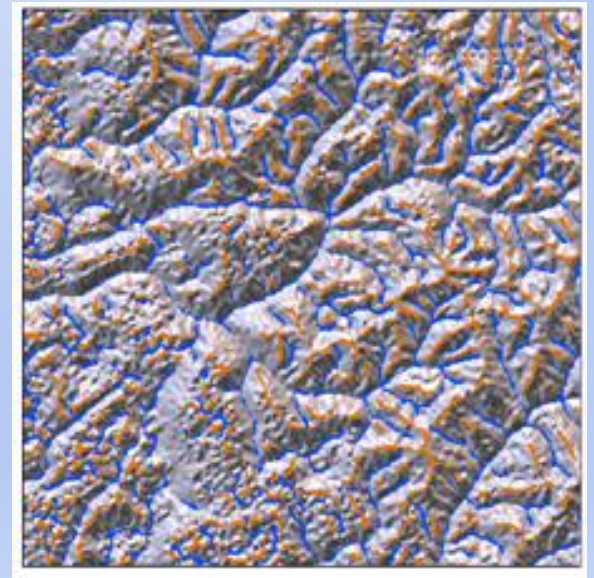
**Isolinhas mais suaves
dependem de modelo
mais refinado.**

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.