



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

SER-300: INTRODUÇÃO AO GEOPROCESSAMENTO

Leonardo Lima

RELATÓRIO DE ATIVIDADES LABORATÓRIO Nº 5: GEOESTATÍSTICA

**INPE
São José dos Campos
2016**

Introdução

O *Laboratório 5* teve como objetivo explorar através de procedimentos geoestatísticos a variabilidade espacial de propriedades naturais amostradas e distribuídas espacialmente. Resumidamente, as etapas constituintes deste estudo empregando técnicas geoestatísticas incluíram: (a) análise exploratória dos dados, (b) análise estrutural (cálculo e modelagem do semivariograma) e (c) realização de inferências (*Krigeagem* ou *Simulação*).

Dados

Os dados utilizados, de propriedade do Centro Nacional de Pesquisas de Solos (CNPS - RJ), foram obtidos no levantamento dos solos da Fazenda Canchim, em São Carlos - SP. Estes se referem a uma amostragem de 85 observações georreferenciadas coletadas no horizonte Bw (camada do solo com profundidade média de 1m). Dentre as variáveis disponíveis, selecionou-se para estudo o teor de argila.

O exemplo aqui apresentado refere-se à análise da variação espacial do teor de argila sobre a área da Fazenda Canchim. Considera-se o teor de argila ao longo do perfil, classificado do seguinte modo (Calderano Filho et al., 1996):

MUITO ARGILOSO: solos que apresentam 59% ou mais de argila;

ARGILOSO: solos que apresentam de 35% a 59% de argila;

MÉDIO: solos que apresentam de 15% a 35% de argila;

ARENOSO: solos que apresentam menos de 15% de argila.

Dentro dos limites da Fazenda Canchim, afloram as seguintes litologias: Arenito Superficial (areias consolidadas), Diabásio (Formação Serra Geral) e Arenito Botucatu (rocha constituída por grãos de quartzo arredondados).

Neste laboratório, foi utilizado o banco de dados SER300_BD_SaoCarlos, e o projeto Canchim, com projeção *UTM/Hayford*, determinado pelas seguintes coordenadas: 47° 52' 04,63"O, 21° 59' 43,63"S; 47° 47' 49,36"O e 21° 54' 14,58"S.

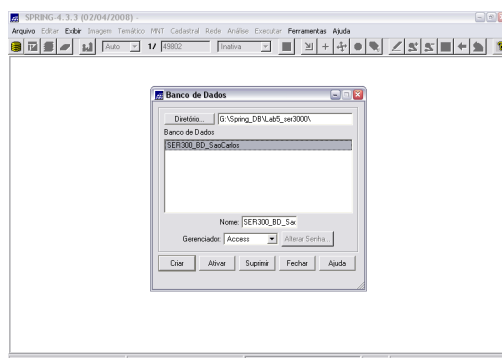


Figura 1 - Ativação do banco de dados SER300_BD_SaoCarlos (Fonte: Elaboração Própria).

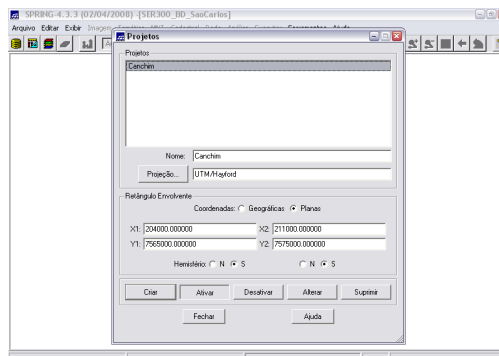


Figura 2 - Ativação do projeto Canchim dentro do banco de dados SER300_BD_SaoCarlos (Fonte: Elaboração Própria).

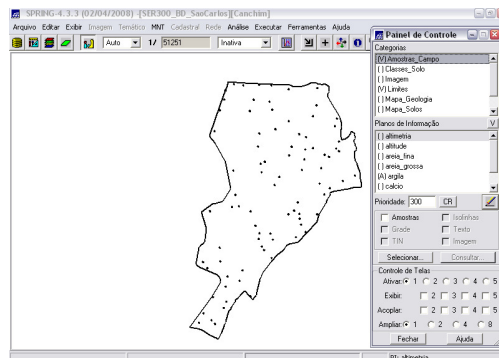


Figura 3 - visualização dos PIs: Recorte (categoria: Limites) e Argila (categoria: Amostras_campo) (Fonte: Elaboração Própria).

Análise Exploratória

No SPRING, a análise exploratória dos dados é realizada através de estatísticas univariadas e bivariadas, ou descritivas (Figura 4).

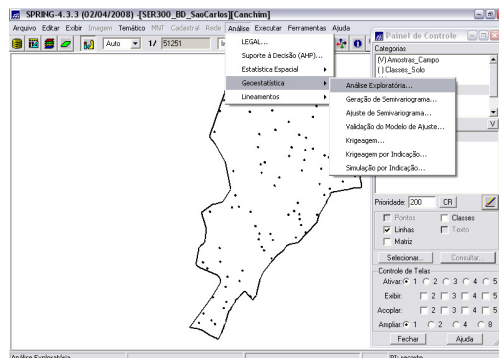


Figura 4 - [Análise] [Geoestatística] [Análise Exploratória] (Fonte: Elaboração Própria)

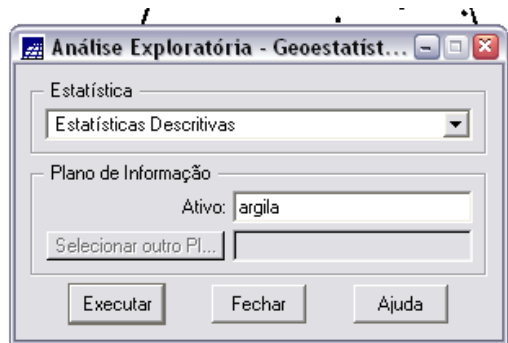


Figura 5 – Interface de Análise Exploratória (Fonte: Elaboração Própria)

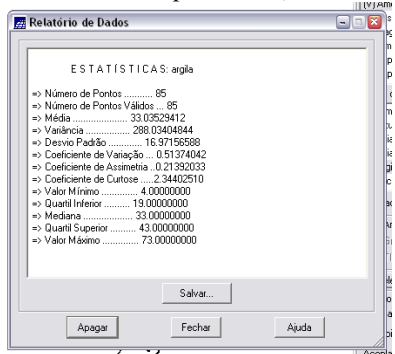


Figura 6 – Estatísticas Descritivas (Fonte: Elaboração Própria)

As estatísticas univariadas fornecem um meio de organizar e sintetizar um conjunto de valores, que se realiza principalmente através do *Histograma*. Características importantes do histograma são organizadas em três grupos:

Medidas de localização: média, valor mínimo, quartil inferior, mediana, quartil superior e valor máximo;

Medidas de dispersão: variância e desvio padrão;

Medidas de forma: coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e coeficiente de variação.

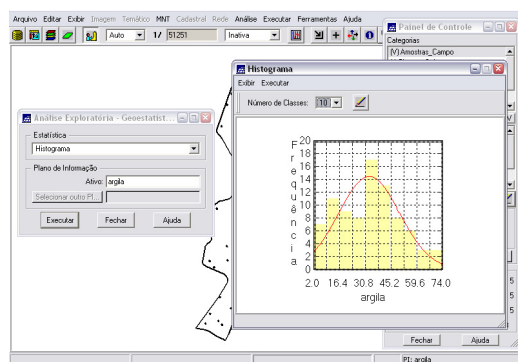


Figura 7 - Histograma (de 10 classes) da Análise Exploratória por Estatísticas Univariadas.

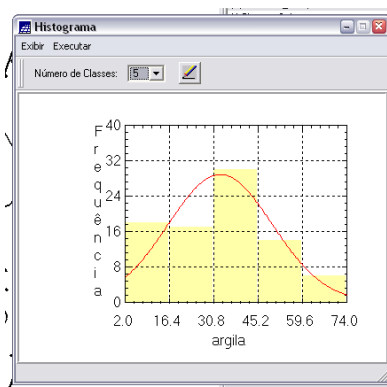


Figura 8 - Histograma de 5 classes (Fonte: Elaboração Própria)

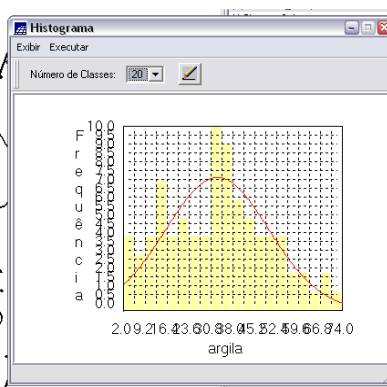


Figura 9 - Histograma de 20 classes (Fonte: Elaboração Própria)

As estatísticas bivariadas fornecem meios de descrever o relacionamento entre duas variáveis, isto é, entre dois conjuntos de dados ou de duas distribuições. Esta relação pode ser visualizada através do *Diagrama de Dispersão* e o grau da relação linear entre as variáveis pode ser medido através do coeficiente de correlação. No *Gráfico da Probabilidade Normal*, a linha vermelha é a distribuição gaussiana e linha azul é argila.

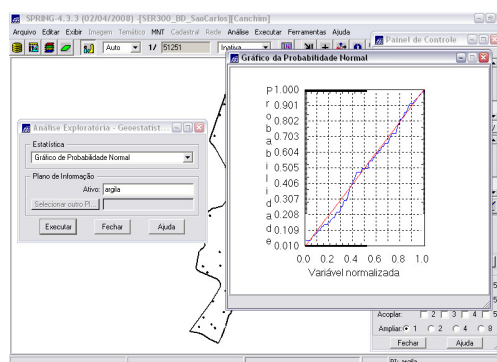


Figura 10 - Gráfico de Probabilidade (Fonte: Elaboração Própria)

Métodos

Nesse exercício foi aplicado, de duas maneiras, o método de interpolação espacial probabilística ou *Krigeagem*: primeiramente, supondo que o fenômeno analisado é isotrópico (distribuição espacial

similar em todas as direções); e posteriormente, supondo a anisotropia – direção preferencial das variabilidade da variável em estudo.

Em ambos os casos, são seguidas as seguintes etapas: análise exploratória dos dados; geração de semivariograma; ajuste da curva gerada; validação do semivariograma; e aplicação da interpolação por *krigeagem*.

Método Isotrópico

A isotropia em fenômenos naturais é um caso pouco freqüente de ser observada. Neste caso, um único modelo é suficiente para descrever a variabilidade espacial do fenômeno em estudo. Na prática quando lidamos com semivariogramas, a primeira suposição é isotropia na tentativa de detectar uma estrutura de correlação espacial. Para tal, utiliza-se tolerância angular máxima (90°), de modo que a direção torna-se insignificante.

Análise da Variabilidade Espacial por Semivariograma

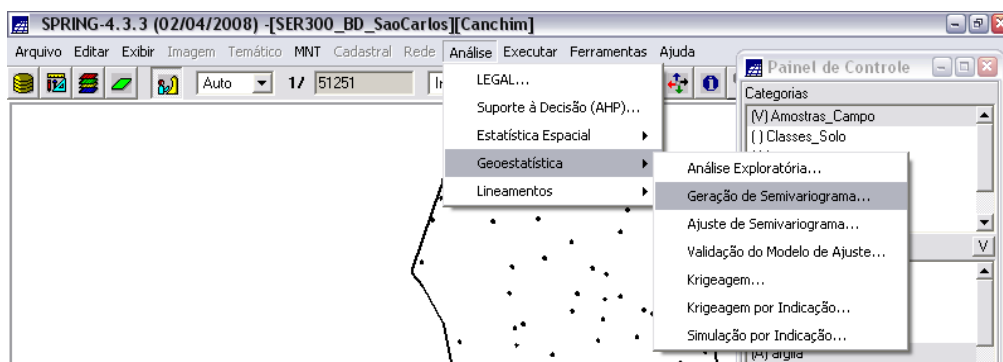


Figura 11 - Análise - Geoestatística - Geração de Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

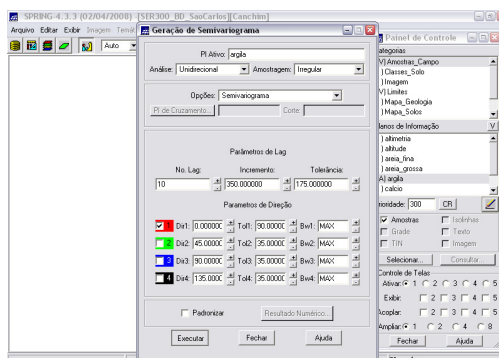


Figura 12 - Análise de Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

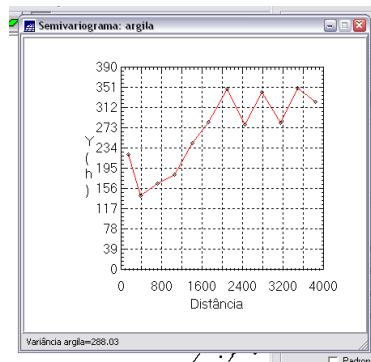


Figura 13 - Semivariograma das amostras de Argila (Fonte: Elaboração Própria)

O semivariograma apresentado na figura acima possui uma variação ou forma não adequada quando comparado a um semivariograma ideal. Para melhorar essa característica é necessário alterar os parâmetros de No. Lag:

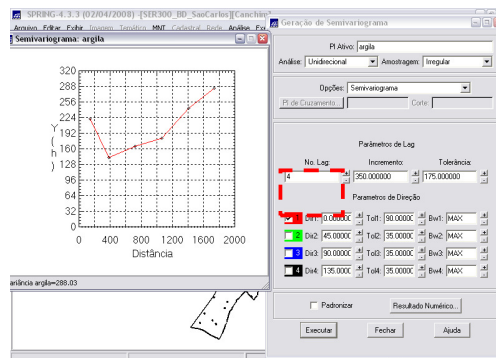


Figura 14 – Análise de Semivariograma com No. Lag 4 (Fonte: Elaboração Própria)

Ajustando-se os parâmetros, obtém-se um semivariograma experimental (Omnidirecional) de variabilidade muito mais próxima da de um modelo ideal (figura 15).

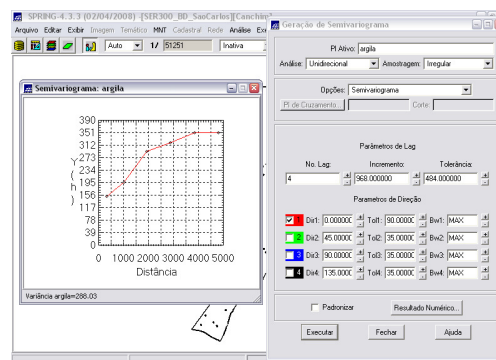


Figura 15 – Análise de Semivariograma. No. Lag = 4, Incremento = 968 e Tolerância = 484 (Fonte: Elaboração Própria)

Modelagem do Semivariograma Experimental

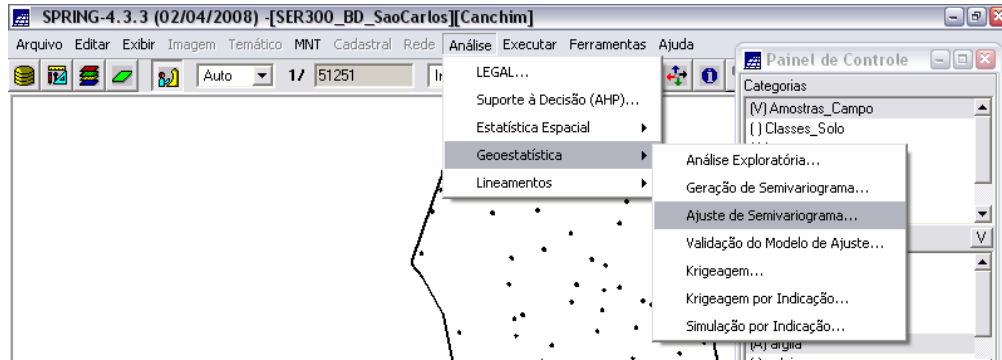


Figura 16 – Análise – Geoestatística – Ajuste Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

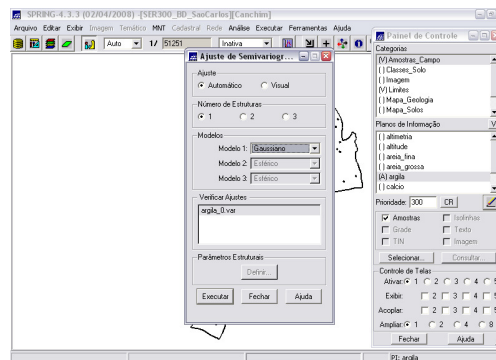


Figura 17 - Ajuste de Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

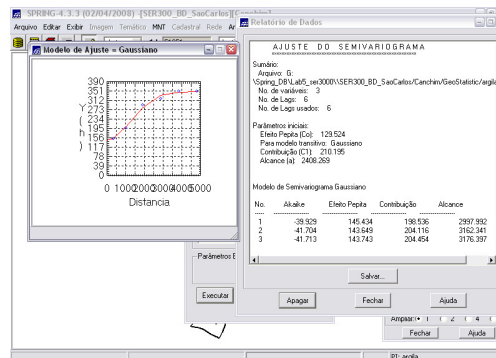


Figura 18 - Ajuste de Semivariograma - Modelo Gaussiano (Fonte: Elaboração Própria)

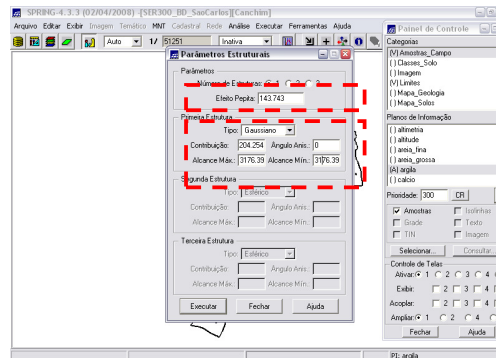


Figura 19 – Ajuste de Semivariograma – Definição de Parâmetros do modelo isotrópico (Fonte: Elaboração Própria)

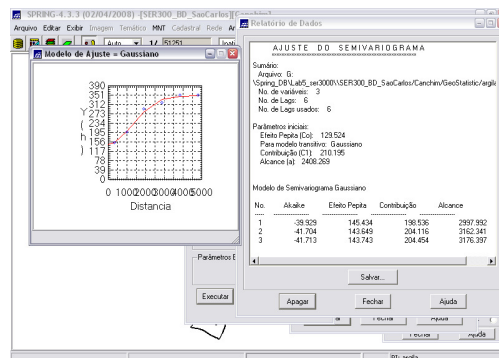


Figura 20 – Ajuste de Semivariograma – Modelo Gaussiano (Fonte: Elaboração Própria)

Validação do modelo de ajuste

O processo de validação do modelo de ajuste (Figuras 21 e 22) é uma etapa que precede as técnicas de *krigeagem*. Seu principal objetivo é avaliar a adequação do modelo proposto no processo que envolve a re-estimação dos valores amostrais conhecidos, obtendo *Diagrama Espacial do Erro* (figura 23) e *Histograma do Erro* (figura 24), *Estatística do Erro* (figura 25) e *Diagrama de Valores Observados × Estimados* (figura 26).

Diagrama Espacial do Erro

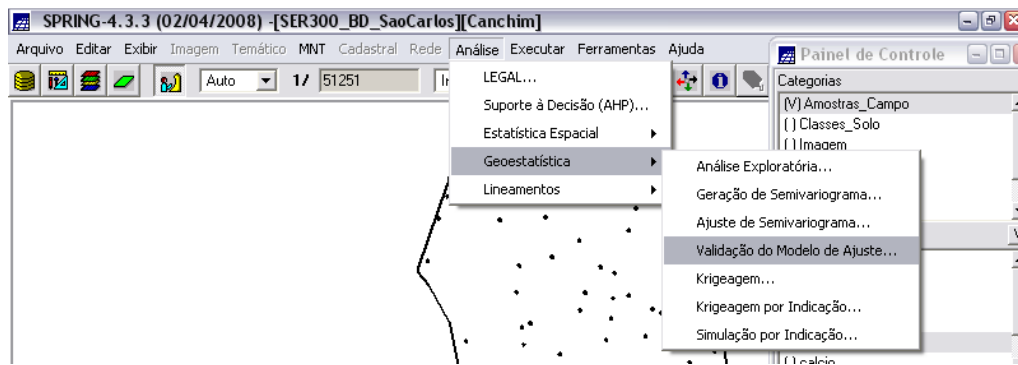


Figura 21 – Análise – Geoestatística – Validação do Modelo de Ajuste... (Fonte: Elaboração Própria)

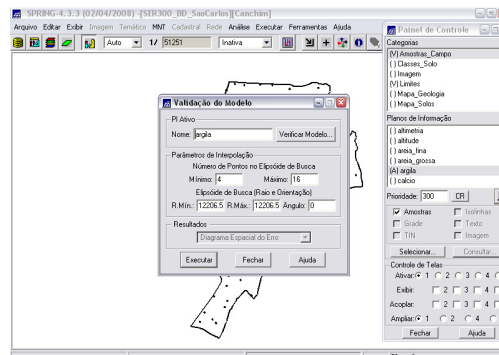


Figura 22 – Validação do Modelo de Ajuste (Fonte: Elaboração Própria)

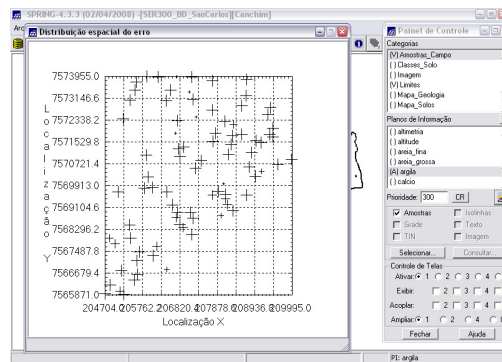


Figura 23 - Distribuição Espacial do Erro (Fonte: Elaboração Própria)

Histograma do Erro

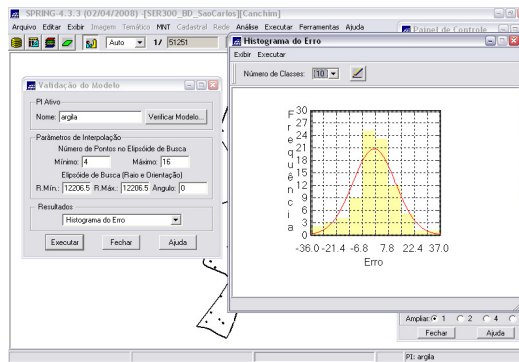


Figura 24 - Histograma do Erro (Fonte: Elaboração Própria)

Estatística do Erro

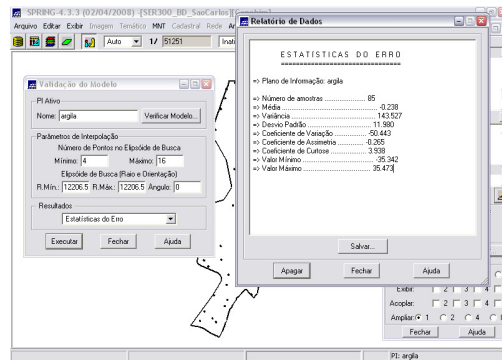


Figura 25 - Estatística do Erro (Fonte: Elaboração Própria)

Diagrama de Valores Observados × Estimados

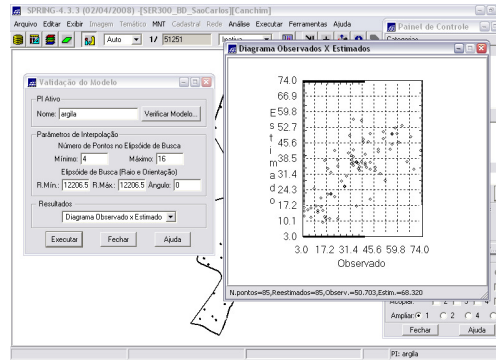


Figura 26 - Diagrama de Valores Observados x Estimados (Fonte: Elaboração Própria)

Interpolação por Krigagem Ordinária

Uma vez realizada a validação do modelo, a etapa final do processo geoestatístico consiste na interpolação de *krigagem*. Esta etapa é realizada conforme os passos contidos nas figuras 27, 28 e 29.

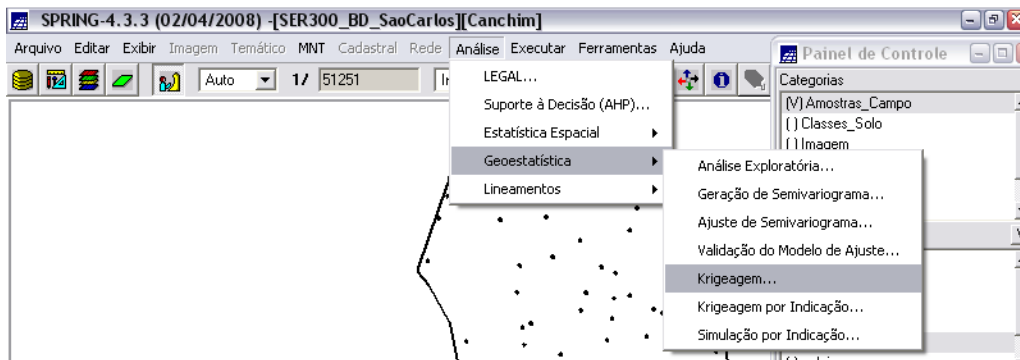


Figura 27 – Análise – Geoestatística – Krigagem (Fonte: Elaboração Própria).

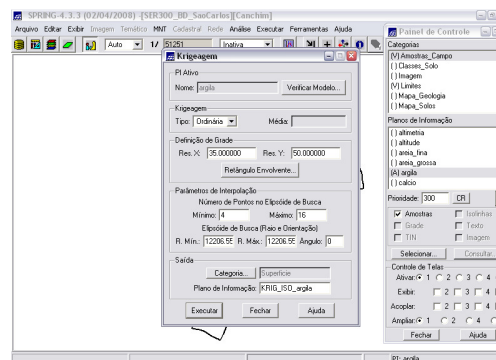


Figura 28 - Krigagem (Fonte: Elaboração Própria)

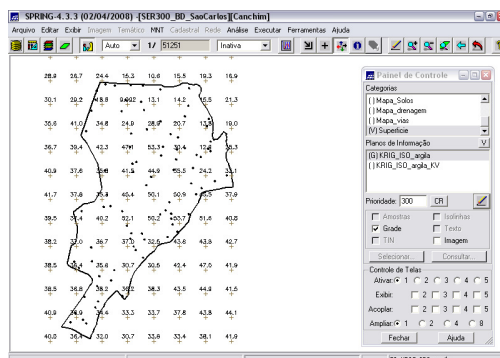


Figura 29 - grade de Krigeagem gerada para Argila (Fonte: Elaboração Própria)

Além disso, o PI KRIG_ISO_argila_KV foi gerado e refere-se à variância de Krigeagem:

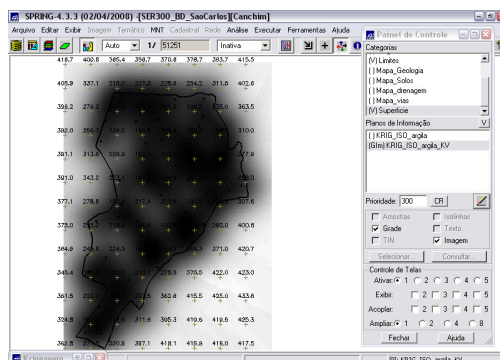


Figura 30 – Visualização do PI KRIG_ISO_argila_KV, gerado com a krigeagem e que refere-se a sua variância (Fonte: Elaboração Própria).

O próximo passo mostra como transformar a grade de krigeagem em imagem (figura 31).

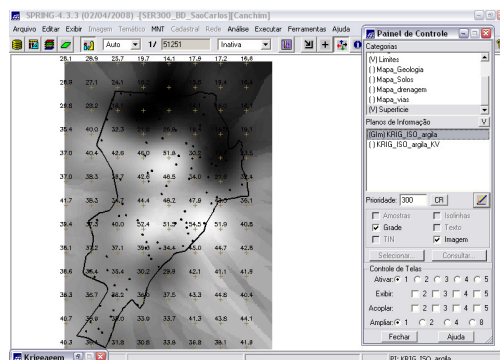


Figura 31 - Imagem gerada a partir da Krigeagem (Fonte: Elaboração Própria)

Os procedimentos geoestatísticos se encerram nessa etapa. A grade de krigeagem apresentada na figura 31 está amostrada; além disso, uma representação ou visualização numérica da mesma é pouco informativa. Além disso, foi executado o recorte da imagem gerada utilizando LEGAL (figuras 32).

Fatiamento e Recorte da Grade do Teor de Argila

Em seguida, procedeu-se com o recorte da imagem utilizando o LEGAL e o fatiamento da grade gerada pela *krigeagem ordinária*, obtendo-se o resultado que consta na figura 34.

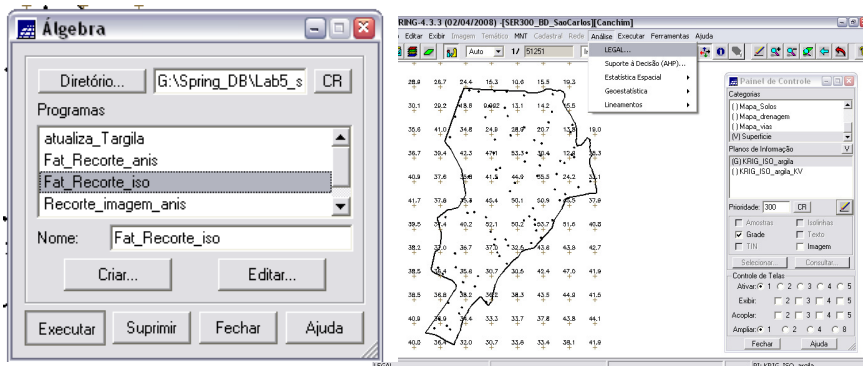


Figura 32 - Análise - LEGAL - Rotina Utilizada; Fat_Recorte_iso (Fonte: Elaboração Própria)

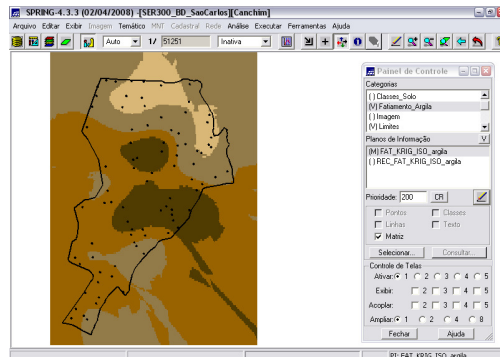


Figura 33 – Fatiamento obtido (PI FAT_KRIG_ISO_argila) (Fonte: Elaboração Própria)

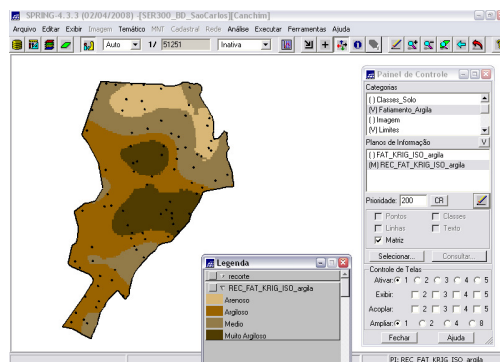


Figura 34 - Recorte Obtido (Fonte: Elaboração Própria)

Método Anisotrópico

A anisotropia em propriedades naturais é um caso muito freqüente. Neste caso, a anisotropia, pode ser facilmente constatada através da observação da superfície de semivariograma, conforme descrito a seguir.

Resumidamente, este método consiste em unir os dois modelos anteriormente definidos num único modelo consistente, que descreva a variabilidade espacial do fenômeno em qualquer direção. Não existe uma forma direta e automática de lidar com a modelagem da anisotropia. Este é um passo importante, e que exige conhecimento e prática com semivariogramas. Neste caso tem-se uma anisotropia combinada. Então, a idéia básica para modelar este tipo de anisotropia é dividir em faixas convenientes o gráfico de semivariogramas, de maneira que, em cada faixa reste somente a anisotropia geométrica.

Detecção da Anisotropia

A superfície de semivariograma é um gráfico, 2D, que fornece uma visão geral da variabilidade espacial do fenômeno em estudo. É utilizado para detectar os eixos de Anisotropia, isto é, as direções de maior e menor continuidade espacial da propriedade em análise. Também conhecido como Mapa de Semivariograma.

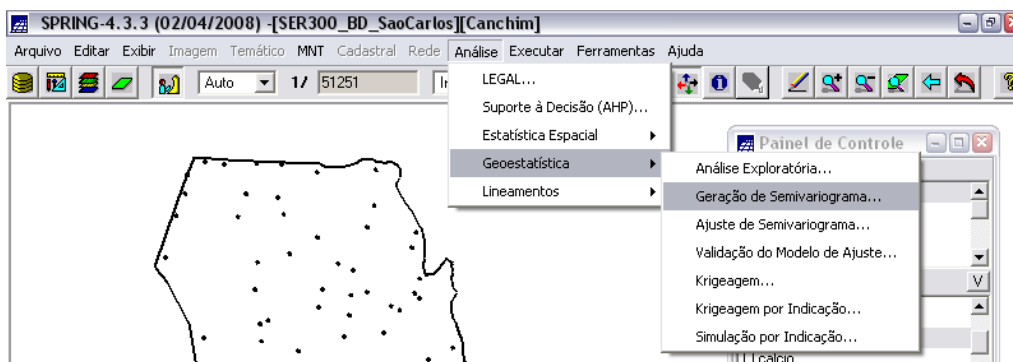


Figura 35 - Análise - Geoestatística - Geração de Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

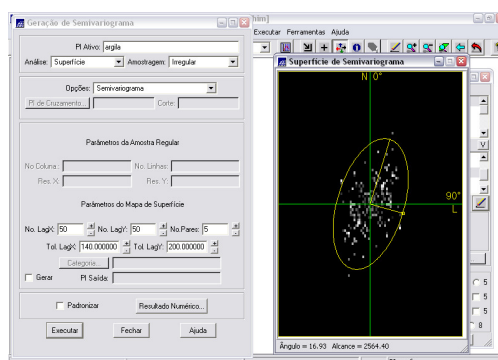


Figura 36 – Visualização da Superfície de Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

Posteriormente, foi realizada a detecção dos eixos de anisotropia. Notou-se que o espalhamento é mais intenso na direção de ~17 graus e menos intenso na direção de ~107 graus. As direções de maior e menor continuidade espacial são forçadas a serem ortogonais (uma elipse imaginária), pois isto é necessário à modelagem da anisotropia conforme será visto mais adiante. Uma vez detectadas as direções da anisotropia, procede-se a geração dos semivariogramas direcionais, conforme segue.

Geração dos semivariogramas direcionais

Na interface de Geração de Semivariograma, foram ajustados os parâmetros de Lag e direção.

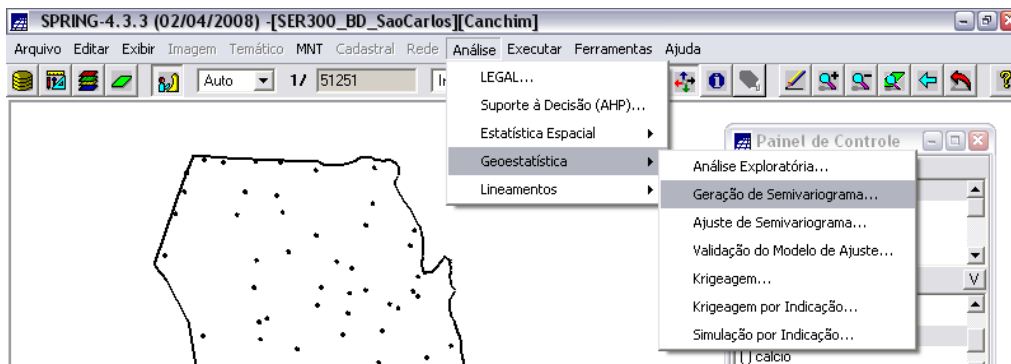


Figura 37 - Análise - Geoestatística - Geração de Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

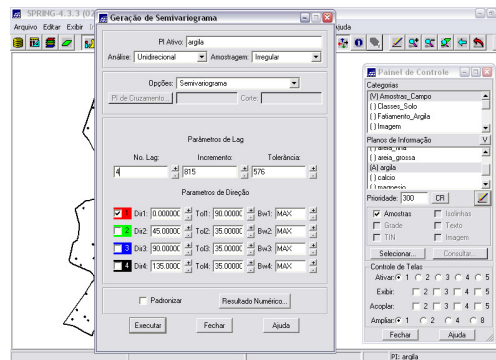


Figura 38 - Geração de Semivariograma para o caso da Anisotropia (Fonte: Elaboração Própria)

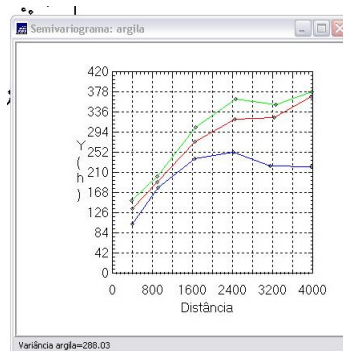


Figura 39 - Semivariograma para argila (anisotropia) (Fonte: Elaboração Própria)

O gráfico da figura 39 ilustra três semivariogramas: um relativo à direção de maior continuidade (verde $\sim 17^\circ$), outro à direção de menor continuidade (azul $\sim 107^\circ$) e o semivariograma omnidirecional (vermelho), que foi gerado somente a título de ilustração, para mostrar que o mesmo representa uma média entre os semivariogramas de maior e menor alcances.

Modelagem dos semivariogramas direcionais

Primeiramente, para a direção de maior continuidade - 17° (Figura 40):

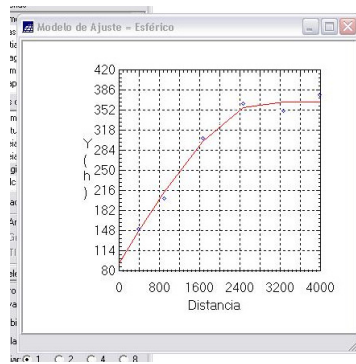


Figura 40 – Semivariograma para direção de maior continuidade 17° (Fonte: Elaboração Própria)

Os parâmetros do modelo estão relatados na interface de Relatório de Dados, onde os valores, arredondados, de Efeito Pepita=91, Contribuição=274 e Alcance=2962. Além desses valores, o modelo é composto de uma única estrutura tipo **Esférico** conforme Equação (1):

$$\gamma_{17^\circ}(h) = 91 + 274 \left[\text{Sph} \left(\sqrt{\left(\frac{h_{17^\circ}}{2962} \right)^2 + \left(\frac{h_{107^\circ}}{\infty} \right)^2} \right) \right] \quad (1)$$

A modelagem do semivariograma na direção de menor continuidade 107° (Figura 41), foi executada de maneira análoga à anterior, sendo que os parâmetros desse modelo na direção de menor variabilidade espacial são: Efeito Pepita=28, Contribuição=203 e Alcance=1677. Este modelo também é composto de uma única estrutura tipo Esférico. De forma manuscrita leva a notação expressa na Equação (2):

$$\gamma_{107^\circ}(h) = 28 + 203 \left[\text{Sph} \left(\sqrt{\left(\frac{h_{107^\circ}}{1677} \right)^2 + \left(\frac{h_{17^\circ}}{\infty} \right)^2} \right) \right] \quad (2)$$

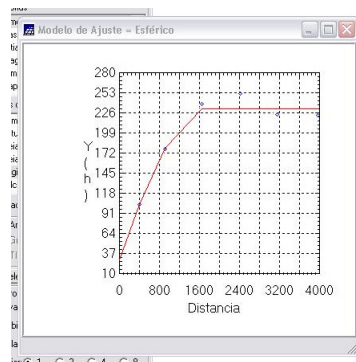


Figura 41 - Semivariograma para direção de menor continuidade 107° (Fonte: Elaboração Própria)

Modelagem da anisotropia

De forma breve, consiste em unir os dois modelos anteriormente definidos num único modelo consistente, o qual descreva a variabilidade espacial do fenômeno em qualquer direção. Não existe

uma forma direta e automática de lidar com a modelagem da anisotropia. Este é um passo importante, e que exige conhecimento e prática com semivariogramas. Neste caso tem-se uma anisotropia combinada. Então, a idéia básica para modelar este tipo de anisotropia é dividir em faixas convenientes o gráfico de semivariogramas, conforme ilustra a figura abaixo, de maneira que, em cada faixa reste somente a anisotropia geométrica.

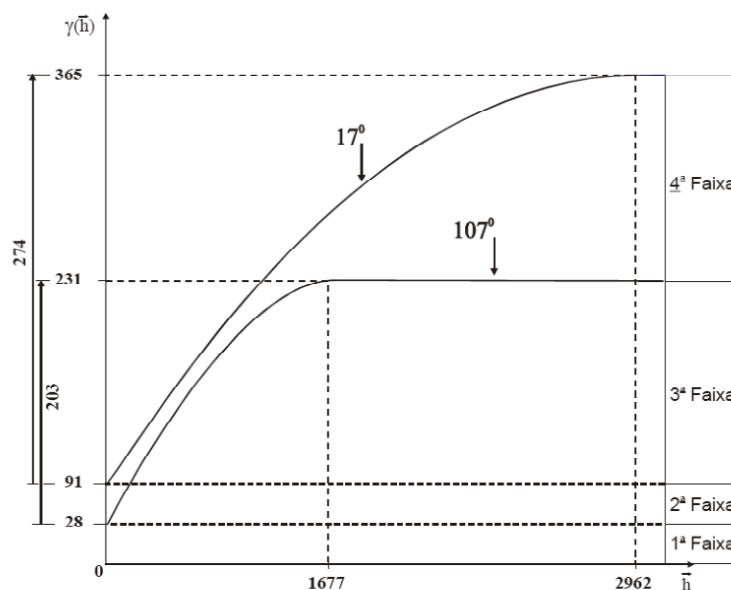


Figura 42 – Gráfico de Semivariograma (Fonte: Elaboração Própria)

Uma vez estabelecido de forma conveniente as faixas, a anisotropia combinada é decomposta graficamente, conforme ilustra a figura 43, de modo que, cada parcela represente somente a anisotropia geométrica.

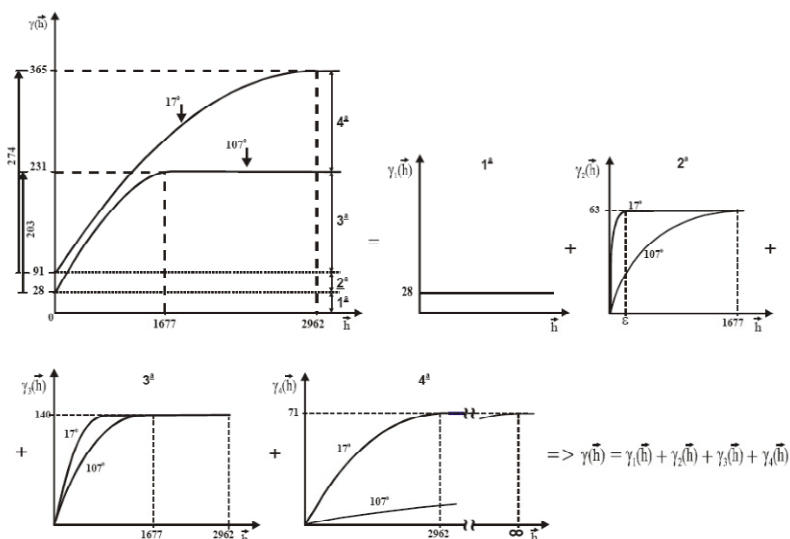


Figura 43 - Anisotropia Combinada (Fonte: Elaboração Própria)

A partir desta decomposição gráfica, define-se o modelo que é:

$$\gamma(\mathbf{h}) = 28 + 63 \left[\text{Sph} \left(\sqrt{\left(\frac{h_{17^\circ}}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{h_{107^\circ}}{1677} \right)^2} \right) \right] + 140 \left[\text{Sph} \left(\sqrt{\left(\frac{h_{17^\circ}}{2962} \right)^2 + \left(\frac{h_{107^\circ}}{1677} \right)^2} \right) \right] + 71 \left[\text{Sph} \left(\sqrt{\left(\frac{h_{17^\circ}}{2962} \right)^2 + \left(\frac{h_{107^\circ}}{\infty} \right)^2} \right) \right]$$

Número de Estruturas		3	
Efeito Pepita		28	
Primeira Estrutura – Tipo: Esférica			
Contribuição	63	Ângulo de anisotropia	17°
Alcance Mínimo	$\varepsilon = 0,00001$	Alcance Máximo	1677
Segunda Estrutura – Tipo: Esférica			
Contribuição	140	Ângulo de anisotropia	17°
Alcance Mínimo	1677	Alcance Máximo	2962
Terceira Estrutura – Tipo: Esférica			
Contribuição	71	Ângulo de anisotropia	17°
Alcance Mínimo	2962	Alcance Máximo	$\infty = 100000$

Tabela 2 - síntese dos parâmetros que compõem o modelo único.

Realizada a modelagem da anisotropia, o próximo passo é gravar o modelo proposto. Isto é realizado com uma cópiados dados da tabela para a *Interface de Parâmetros Estruturais* (figura 44).

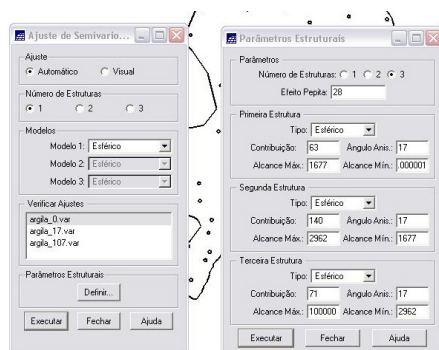


Figura 44 - Gravação de Modelo (Fonte: Elaboração Própria)

Validação do modelo de ajuste

A análise do semivariograma compreende o levantamento do semivariograma experimental e, posteriormente, o ajuste a uma família de modelos teóricos. Em toda esta seqüência, existe sempre certo grau de incerteza sobre os parâmetros ajustados aos modelos. Esta incerteza é o *erro da estimativa*, que pode ser obtido através do procedimento chamado *validação do modelo*.

O processo de validação do modelo de ajuste é uma etapa que precede as técnicas de krigagem. Seu principal objetivo é avaliar a adequação do modelo proposto no processo que envolve a re-estimação dos valores amostrais conhecidos por meio dos parâmetros ajustados ao modelo do semivariograma.

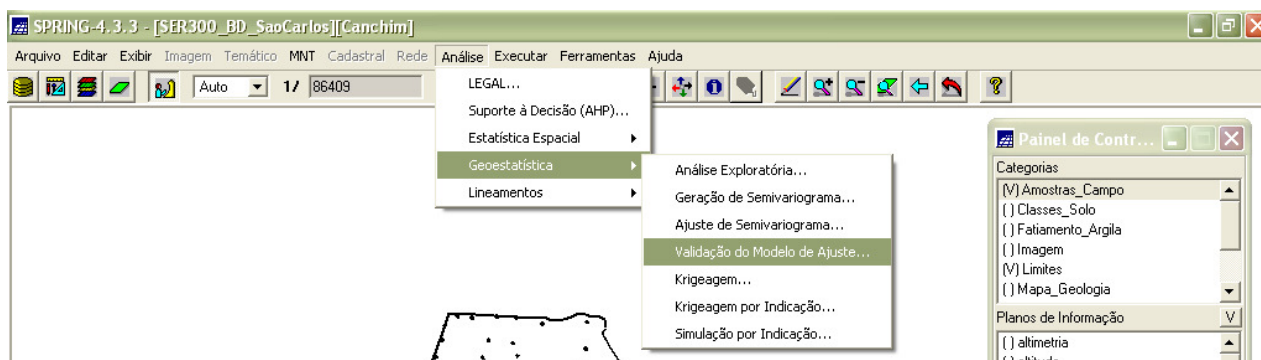


Figura 45 - Análise - Geoestatística - Validação do Modelo de Ajuste (Fonte: Elaboração Própria)

Diagrama Espacial do Erro

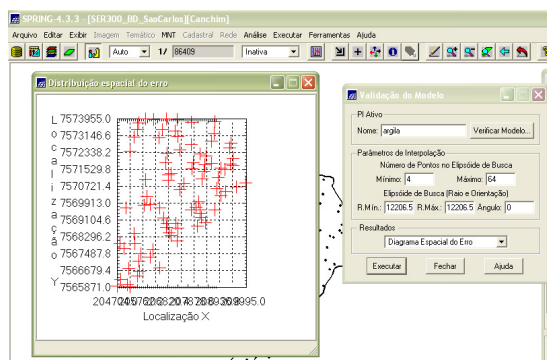


Figura 46 - Distribuição Espacial do Erro (Fonte: Elaboração Própria)

Histograma do Erro

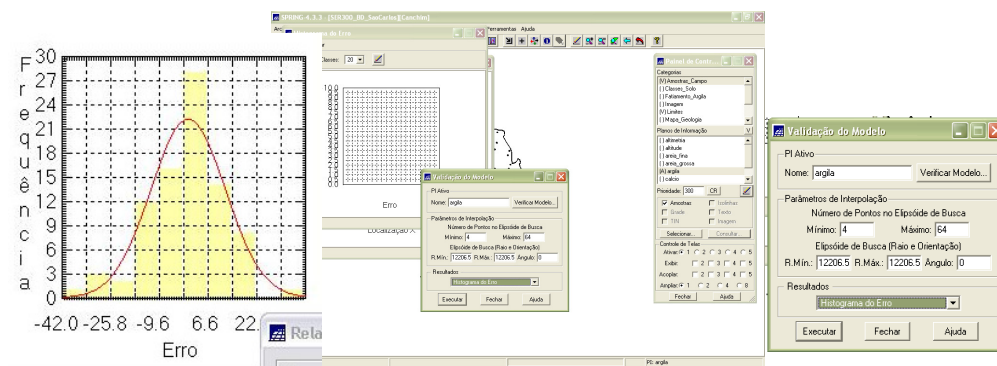


Figura 47 - Histograma do Erro (Fonte: Elaboração Própria)

Estatística do Erro

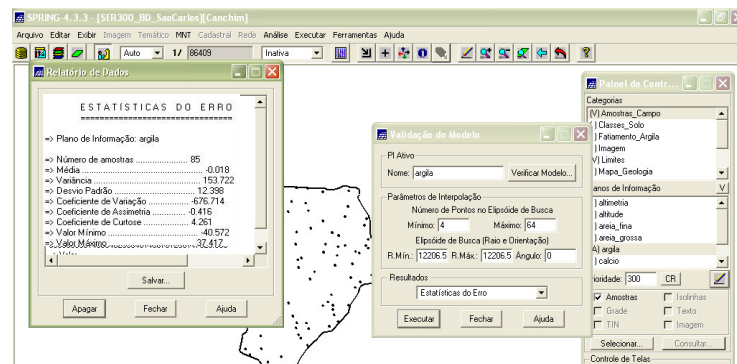


Figura 48 - Estatística do Erro (Fonte: Elaboração Própria)

Diagrama de Valores Observados x Estimados

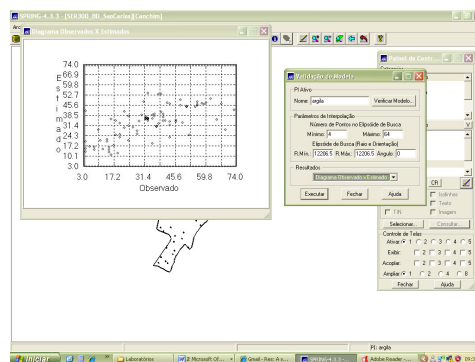


Figura 49 - Diagrama de Valores Observados x Estimados (Fonte: Elaboração Própria)

Interpolação por krigeagem ordinária

Uma vez realizada a validação do modelo, a etapa final do processo geoestatístico consistiu na interpolação de *krigeagem* (Figura 4.40). Antes de executar a *krigeagem*, é recomendável verificar os resultados da validação. Problemas óbvios podem ser identificados com os parâmetros de entrada (por exemplo, a especificação do semivariograma) ou com os dados (por exemplo, valores aberrantes, ou *outliers*).



Figura 50 - Análise - Geoestatística – Krigagem (Fonte: Elaboração Própria)

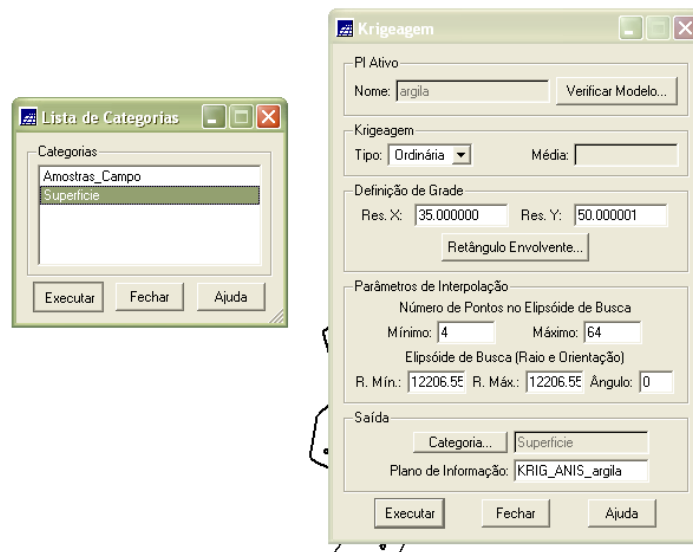


Figura 51 - Krigeagem (Fonte: Elaboração Própria)

Após executar a *krigeagem* foi possível observar na Interface do Painel de Controle que o PI KRIG_ANIS_argila, está disponível para visualização. Além disso, foi criado o PI KRIG_ANIS_argila_KV, que se refere à variância de *Krigeagem*.

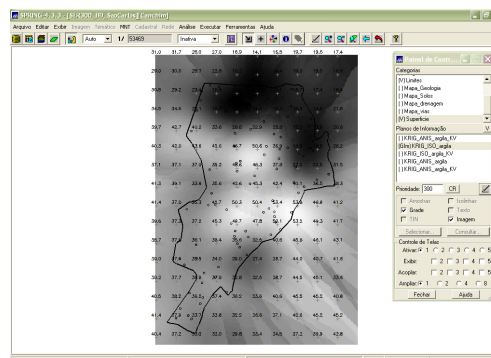


Figura 52 - Visualização da grade de Krigeagem gerada de Argila (Fonte: Elaboração Própria)

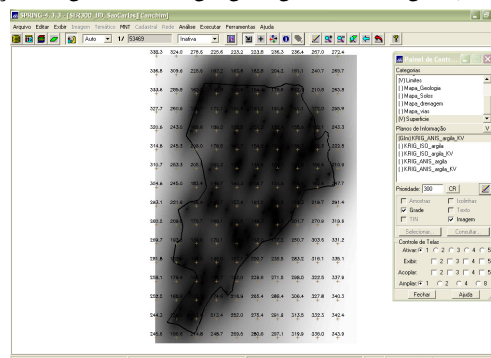


Figura 53 - PI KRIG_ANIS_Argila_KV gerado por krigeagem (referente a variância) (Fonte: Elaboração Própria)

Visualização da Superfície de Argila Oriunda do Modelo Anisotrópico

Executou-se o recorte na imagem oriunda do modelo anisotrópico (figura 54), além do fatiamento e recorte na grade de Krigagem oriunda do modelo anisotrópico (Figura 55).

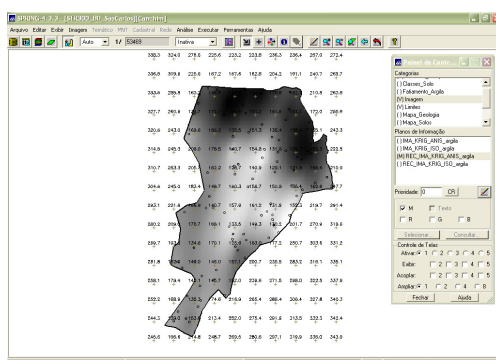


Figura 54 - Recorte da Imagem (Fonte: Elaboração Própria)

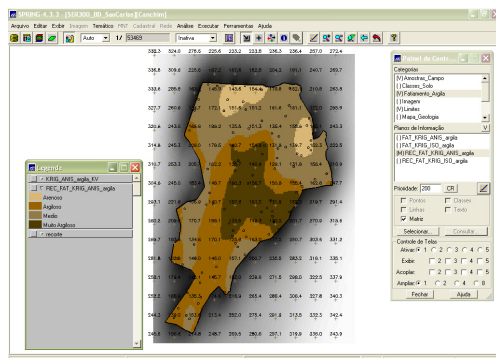


Figura 55 – Fatiamento (Elaboração Própria)

Análise dos Resultados

A variabilidade espacial, do teor de argila, entre o caso isotrópico e anisotrópico pode ser comparada através das figuras 56 e 57. Foi calculado o teor médio de argila para cada classe de solo, a partir das superfícies isotrópicas e anisotrópicas, e atualizou-se a tabela de atributos (figura 5.3).

Em seguida, foi realizado um *Agrupamento por Quartil* para os atributos TEOR_ARGILA_ISO e TEOR_ARGILA_ANIS. Os resultados podem ser vistos e comparados nas figuras 59 e 60.

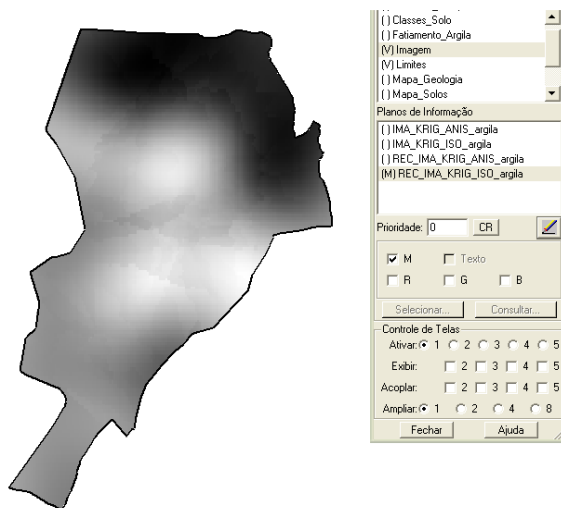


Figura 56 – Resultado de Argila (isotropia) (Fonte: Elaboração Própria)

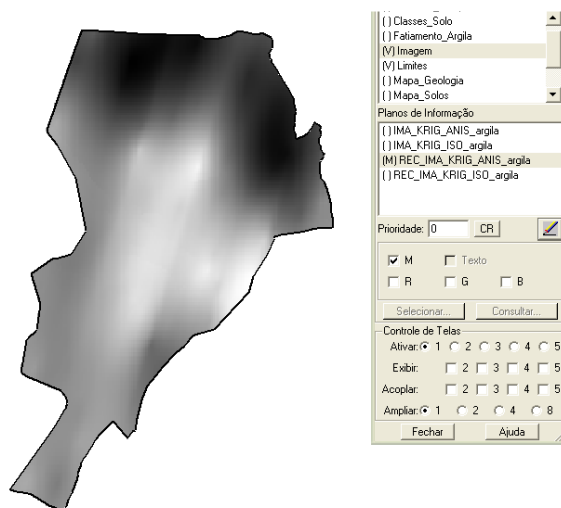


Figura 57 - Resultado de Argila (anisotropia) (Fonte: Elaboração Própria)

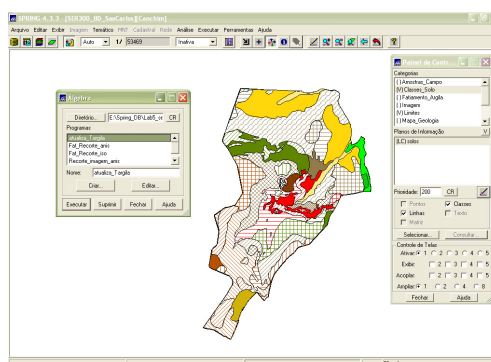


Figura 58 - Teor Médio de Argila (Fonte: Elaboração Própria)

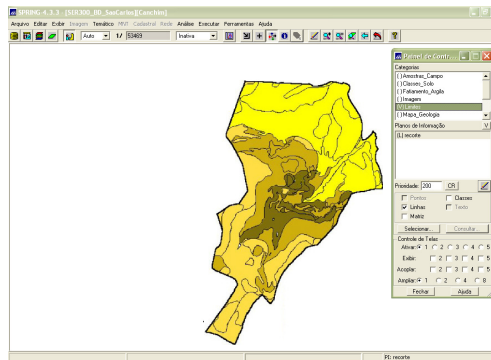


Figura 59 - Agrupamento por quartil para o caso isotrópico (Fonte: Elaboração Própria)

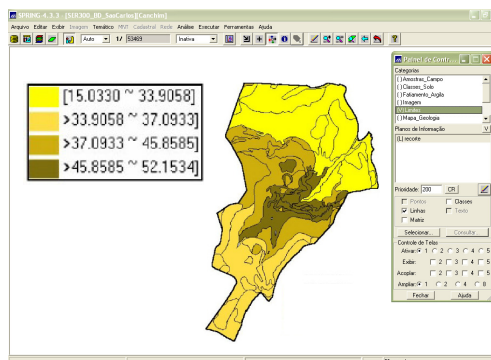


Figura 60 - Agrupamento por quartil para o caso anisotrópico (Fonte: Elaboração Própria)

Conclusão

Utilizar técnicas de *krigeagem* por semivariograma supondo *anisotropia* da variável argila e sua posterior relação com o tipo de solo e geologia, parece ser mais precisa do que a aplicação da técnica de *krigeagem* utilizando o método que admite a *isotropia*. Isso parece ter ocorrido porque, uma vez que se identifica a direção preferencial da variação do fenômeno analisado por meio da geração do semivariograma de superfície, torna-se possível obter uma estimativa com maior grau de precisão espacial da variável analisada.

Assim, o *Laboratório 5* forneceu conhecimentos sobre práticas de análise geoestatística, com o auxílio do *software* SPRING, onde foram analisados os resultados em função das imagens, dos semivariogramas e dos relatórios gerados.