

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 à 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' 0.46"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)

	<u> </u>
🔜 Análise Exploratória	a - Geoestatíst 🖃 🗆 🔯
– Estatística	
Estatísticas Descritivas	
- Plano de Informação	
Ativo: a	argila
Selecionar outro PI	
Executar Er	echar Aiuda
	• /
Interface de Análise Ext	ploratória (Fonte: Elabora

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;

Figura

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

Arquivo Editar Exbir Imagem Temético MNIT Cadastral Rede	Análise Executar Ferramentas Ajuda añva 💌 🔟 🕂 💠 💽 Categorias
	MAmostras_Campo
	🖪 Histograma 📃 🗆 🔯
	Exibir Executar
<i>F</i>	Número de Classes: 10 💌 🗾
🔜 Análise Exploratória - Geoestatist 🖃 🗉 🔯	V
- Estatística	_ 20
Histograma 💌	F 20
Plano de Informação	A 16
Ativo: argia	q14
Selecionar outro PI	u ¹²
Eventer Earbar Airda	ê 8
(.	ĩ 4 X
	a 2
	20 164 308 452 596 74 0 5
	argila 5
	5
4.0	
\sim	Fechar Ajuda

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 - Grafico 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)

SPRING-4.3.3 (02/04/2008)	[SER300_BD_SaoCarlos][Canchim]	
Aroguno Editar Exbir Imagen Tendi 19 11 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	Gerração de Semivariograma P Añec Jação Andére Undecional Andére Undecional Deções (Semivariograma P de Caramento Cons	Painel de Controle
	Particulario de Lag 10 10 10 10000000 110000000 11 10 10000000 110000000 110000000 11 10000000 11 10 10000000 1100000000 1100000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 110000000 1100000000 1100000000 1100000000 110000000 110000000 1100000000 110000000 110000000 110000000 1100000000 1100000000 110000000 110000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 1100000000 11000000000 110000000000 110000000000000 1100000000000000000000 1100000000000000000000000	lance de homme/o ví lance instruction de lance in
	Padenizer Resultado Numérico Executar Fechar Ajuda	Exter: 1 2 3 4 5 Acopter: 2 3 4 5 Amptar: 6 1 C 2 C 4 C 8 Fechar Ajuda

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)

🛱 Distribuição espacial do erro		🗖 Painel de Controle 🛛 🖃
	0 🦠	Categorias
7573955.0 1573146.6 7573146.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573158.2 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 7573148.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757314.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 757414.6 7574		Joyana Gray and Carego (1) Glacera, Solo (1) Blagme (1) Glacera, Solo (1) Blagme (1) Marca, Sola (1) Marca, Sola (1) Marca, Sola (1) Marca, Sola (1) Marca, Sola (1) Marca, Sola (1) antuba (1) antuba (1) antuba (1) antuba (1) antuba (1) antuba (1) antuba (1) antuba (2) antuba (1) antuba (1) antuba (1) antuba (2) antuba (1) antuba (3) antuba (1) antuba (3) antuba (1) antuba (3) antuba (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2)

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

Histograma do Erro

i 🜃 💆 💋 🔝 Auto	■ 1/ 51251	Histograma do Erro sbir Executar	
Validação do Modelo PlAto PlAto Platon to do Modelo PlAto More açola Nome açola Nome açola Partonitos do Interplatos Nome açola Nome açola Platonitos do Interplatos Nome açola Platonitos do Interplatos Platonitos do Interplatos Platonitos do Interplatos Platonitos	Vetice Models	Nome de Clainer 9 9 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	7.0
	<u> </u>	Ampliar G	1 C 2 C 4 char Ajuda

Figura 24 - Historgrama 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 Krigeagem Ordinária

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



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



Figura 28 - Krigeagem (Fonte: Elaboração Própria)

5PRING-4.3.3 (02/04/	2008) -[SER 30	0_BD_SaoCar	los][Cano	chim]										-	2
Arquivo Editar Exibir Imagen	r Temático MNT	Cadastral Re:	ie Análise	Execut	ar Fer	rament	as Ajud	a							
🖲 🖻 🗲 🚺 🛛	uto 💌 1/ 🗄	11251	Inativa	۲		Ы	+ 🏘	0	۰,	∠	<u>9</u> * 9	c 🖉	\$	5	1
28.9 26.7 24.4	15.3 10.6	15.5 19.3	16.9					1	Pa	inel	de Con	trole		. ×	n
· · /*		<u>,</u>	+						Catego	nias					
30.1 20.2 48.8	9.992 . 13.1	14.2 6.5	21.3						()Ma	pa_Sc	los			*	
1	• •	• >							()Ma	pa_dn	enagem				
30.6 41.0 34.8	24.9 24.0	2017 13-8	19.0						(V)S	pa_vic perfici	e				
107 104 477	4741 53.34	NA 124	1.						Planos	de Inf	omação			٧	
1 14. 14. At.	÷ ÷	+ +	(**						(G) K	RIG_IS	0_argila			_	
40.0 37.6 date	41.5 44.9	55.5 * 24.2	7						()KB	IG_ISI	D_argila,	,KV			
1	•		1												
41/ 340 A	· 40.4 90.1	· + /+	31.9						Priorid	sde: 🛛	00	CR		Ζ	
32.5 34 40.2	92.1 99.2	03.7 01.6	40.8						E	most	93	E la	dinhas		1
		1	+						P (àrade		E Id	ote		
38.2 32.0 36.7	37.0 .32.6	1 43.8 43.8	42.7						Е	FIN		⊢ In	agem		
1	-/	Date: Factor	17212						Se	lesion	ðf	Co	nsultar.		
100 100 100	· */ ***	*2.* */.0	+1.4						Contr	ole de	Telas	-		-	
38.5 36.8 38.2	. 342 SR3	43.5 44.9	41.6						Ativ	ar.(•	1 C 2	C 3	C 4	C 5	
* */ ./	\sim ·	+ +	+						Exi	bin	2	□ 3	F 4	5	
40.0 70.0 70.0	33.3 31.7	37.8 43.8	44,1						Acop	lar:	□ 2	□ 3	4	F 5	
4.1									Ampl	iar.(•	1 0	2 C	4 (8	
4Q.0 3Q7V 320	30.7 34.8	3 <u>1</u> ,4 <u>3</u> <u>4</u> ,1	41,9							Fech	ar	A	juda		ġ.
						_		_		PI: K	RIG ISC	arola	_		-

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.

		• v t		
Í		Áleebra 🗧 🗖 🕅	RING	-4.3.3 (02/04/2008) -[SER300_BD_SaoCarlos][Canchim]
1	#	Migenia Com	Edito	ar Exbir Imagem Temático MNT Cadastral Rede Análise Executar Ferramentas Ajuda
	-		1 🖉	🜌 🔬 Auto 💌 1/ 51251 🕞 LEGAL 🥀 🖲 🔍 🗹 🕱 🕵 🧟 😓
4		the second secon	*	+ + + + + + Suporte à Decisão (AHP)
- 11		Diretório G:\Spring_DB\Lab5_s CR	28,1	a 26.7 24.4 15.3 10.6 15.5 19.3 Estatistica Espacial 🕨 📠 Painel de Controle 🖃 🗉 🔯
				Geoestatistica Categorias
		Programas	30.	1 202 Alke 0402 111 112 005 Circlamerkos () Mapa_Solos
			30,	8 41,0 34,8 24,9 28,9 20,7 13,8 18,0 ()Mapa_via
		atualiza_l argila 📃 📃	- T	(V) Superice
		Eat Becorte anis	36.	7 394 423 421 523 94 128 353
			40.1	a 37.6 35.6 41.5 44.8 55.5 24.2 31
			+	
		Recorte imagem anis 🛛 🚽	41	7 37.6 As 45.4 50.1 50.9 1 50.9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
×		,		
		Nome: Eat Becorte iso	Υ	F Grade T Texto
-1			38.	2 320 367 370 325 438 438 427 □ TIN □ Imagem
				Selecionar Consultar
- 11		Unar Editar	34	Controle de Telas
			38.3	5 38.8 38.2 342 38.3 43.5 44.8 41.5
1				
- 11		Eucoutor Suprimir Fecher Aiude	401	$p = \frac{1}{2} $
	L		40,1	8 36 320 307 338 334 381 418 Fechar State
	_			+ + + + + + + +
		3J	GAL	PI: KRIG_ISO_argla

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 semvariogramas 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)

🛃 SPRING-4.3.3 (02)	🖉 Geração de Semivariograma 📃 🗆 🔀						-	• 🛛
Arquivo Editar Exter I/	Pl Alfvo: argla Análice: Unideccional 💌 Amostragen: Irregular 💌	euda -	0	<u> </u>	<u>s</u>	7	2	?
	Dppões: Semivariograma 💌 Pi de Cruzamento Corte		Catego (M) An () Catego	rinet de C xias nostras_Ca isses_Solo	mpo	e 🖃		
ķ	Parámetros de Log No Lag: Incremento: Toleráncia:		Planos () Ini Planos () are	samento_Ar agem : de Informa :a_prossa	ição		• >	
ŗ.	4 4 815 4 576 4 Perametros de Diseção		(A) ar () cal ⊡ na Priorid	gila cio anesio ade: 300	CR		•	
).	Dut: 1000000 10t: 900000 8wi: MAX 1 Du2 Du2 450000 1 Tel2: 350000 8w2 MAX 1 Du3: Du3: 900000 4 Tel2: 350000 4 Bw3 MAX 4			Amostras Stade FIN Necionar		Isolinha: Texto Imagem Consulta	1 6	
	Diek 135.0000 d Tolk 35.0000 d Diek MAX d		- Contr Ativ Exi	ole de Tela vaci€ 1 i C bic i I bic I I	2 C 2 T	3 C 4 3 T 4 3 T 4		
4.	Executar Fechar Ajuda		Ampl	iac. € 1 Fechar	C 2	C 4 Ajuda		

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 ~17°), outro à direção de menor continuidade (azul ~107°) 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 - 17º (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):

$$\gamma_{17^{0}}(\mathbf{h}) = 91 + 274 \left[\text{Sph}\left(\sqrt{\left(\frac{\mathbf{h}_{17^{0}}}{2962}\right)^{2} + \left(\frac{\mathbf{h}_{107^{0}}}{\infty}\right)^{2}} \right) \right]$$
(1)

A modelagem do semivariograma na direção de menor continuidade 107º (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):



Figura 41 - Semivariograma para direção de menor continuidade 107º (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:

$$\begin{split} \gamma(\mathbf{h}) &= 28 + 63 \left[Sph \left(\sqrt{\left(\frac{\mathbf{h}_{17^{0}}}{\epsilon}\right)^{2} + \left(\frac{\mathbf{h}_{107^{0}}}{1677}\right)^{2}} \right) \right] + 140 \left[Sph \left(\sqrt{\left(\frac{\mathbf{h}_{17^{0}}}{2962}\right)^{2} + \left(\frac{\mathbf{h}_{107^{0}}}{1677}\right)^{2}} \right) \right] + \\ &+ 71 \left[Sph \left(\sqrt{\left(\frac{\mathbf{h}_{17^{0}}}{2962}\right)^{2} + \left(\frac{\mathbf{h}_{107^{0}}}{\infty}\right)^{2}} \right) \right] \end{split}$$

Número de Estruturas	6	3				
Efeito Pepita		28				
Primeira Estrutura – 1	ipo: Esférica					
Contribuição	63	Ângulo de anisotropia	17°			
Alcance Mínimo	ε = 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 17º				
Alcance Mínimo	2962	Alcance Máximo ∞ = 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 krigeagem. Seu principal objetivo é avaliar a adequação do modelo proposto no processo que envolve a reestimação 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

SPRING 4.3.3 - [SER300_B0_SacCarlos][Canchim] Argavo Edter Exter Imagem Temétro MVT Cadistral Rode Análse Exer To The Second Seco	otar Ferramentas Aluda I III III III III III III III IIII II
Distribuicio especial do erro L 7573955.0 0 7573146.6 0 757328.2 1 757021.4 1 757021.4 2 7568913.0 0 757348.2 7571528.2 1 7570521.4 2 7568913.0 0 757487.8 7566679.4 2 04742657262:0.732820.9328905.0 Localização X	Aniclacian do Mandelo Platre Pl

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 × 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)

	Krigeagem
Lista de Categorias	Krigeagem Image: Control of the second s

Figura 51 - Krigagem (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 Krigeagem oriunda do modelo anisotrópico (Figura 55).







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.