



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
CAMPUS DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

**APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA NO RASTREAMENTO DE
MAGNETITA NA MINA DO SOSSEGO A PARTIR DE DADOS DE
SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA**

POR

WANDERLEY DOS ANJOS SABINO

ORIENTADOR
PROF. MSC. MARINÉSIO LIMA

MARABÁ – PA
2009

WANDERLEY DOS ANJOS SABINO

**APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA NO RASTREAMENTO DE
MAGNETITA NA MINA DO SOSSEGO A PARTIR DE DADOS DE
SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção de graduação em Engenharia de
Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. MsC. Marinésio Lima

Co-orientador: MsC. Márcio Souza Soares

Área de concentração: Planejamento de Lavra
de Longo Prazo.

MARABÁ – PA
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II do CAMAR/UFPA, Marabá, PA

Sabino, Wanderley dos Anjos

Aplicação da geoestatística no rastreamento de magnetita na Mina do Sossego a partir de dados de suscetibilidade magnética / Wanderley dos Anjos Sabino ; orientador, Marinésio Lima. — 2009.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2009.

1. Geologia - Métodos estatísticos. 2. Engenharia de minas - Métodos estatísticos. 3. Magnetita - Canaã dos Carajás (PA). I. Lima, Marinésio, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 551.028

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,

Aprova o Trabalho de Conclusão de Curso

**APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA NO RASTREAMENTO DE MAGNETITA NA
MINA DO SOSSEGO A PARTIR DE DADOS DE SUSCEPTIBILIDADE
MAGNÉTICA**

Elaborado por

Wanderley dos Anjos Sabino

Como requisito para obtenção de Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Pará, no Campus de Marabá (Marabá-PA).

Data: 03/07/2009

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. M. Sc. Marinésio Lima
Universidade Federal do Pará
(Presidente/Orientador)

Prof. M. Sc Alexandre J. B. Macedo
Universidade Federal do Pará
(Membro)

M. Sc. Márcio Souza Soares
Gerência de Planejamento de Longo Prazo e Geologia - Vale
(Membro)

MARABÁ – PA

2009

**Aos meus pais, Maria e Newton, aos meus irmãos, Ricardo e Rivanete e orientadores
Marinésio e Márcio pelo apoio e compreensão.**

AGRADECIMENTOS

Foram muitos livros, horas de entrevista e muitas noites sem dormir, na construção desta trajetória de pesquisa. Muitos foram os que contribuíram e não seria justo deixar de mencionar e agradecer meus grandes companheiros nessa jornada.

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pois a minha existência seria impossível sem a sua misericórdia e amor. Agradeço também a minha família pelo apoio e paciência, aos professores que contribuíram para a minha formação acadêmica não só compartilhado seu conhecimento como me propondo desafios que me ajudaram a perceber minhas limitações, levando-me a lutar para evoluir.

Um especial agradecimento ao meu orientador Prof. Marinésio Lima por acreditar que minha ideia inicial tinha potencial para se transformar neste trabalho e me apoiar nesta aventura intelectual. Não poderia deixar de reconhecer a ajuda inestimável de meus co-orientadores Márcio Soares e Sandro Freitas que, apesar de suas múltiplas ocupações, tiveram a gentileza de compartilhar parte de seu tempo e conhecimento comigo, fornecendo-me ajuda vital para desenvolver esta pesquisa, sem eles também não poderia chegar até aqui.

Agradeço também à mineradora Vale por disponibilizar os dados que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho e a todos os seus colaboradores que possibilitaram minhas visitas à mina do Sossego para que eu pudesse receber orientação direta de meus co-orientadores.

Diante disto, nada mais justo que o tempo verbal do trabalho seja a primeira pessoa do plural, pois ninguém pode produzir conhecimento a partir do nada e sem a ajuda de outras pessoas, pois entendo que o ato de conhecer é um processo interativo e social, construído na convergência e divergência de ideias e objetivos, um exercício de humildade.

"A Matemática é o alfabeto com o qual Deus escreveu o Universo."

Galileu Galilei

"Para os crentes, Deus está no princípio das coisas. Para os cientistas, no final de toda reflexão."

Max Planck

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
EPÍGRAFE	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
RESUMO	01
ABSTRACT	02
1. INTRODUÇÃO	03
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	08
2.1 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES ESTATÍSTICAS	09
2.1.1 População	10
2.1.2 Amostra	10
2.1.3 Média aritmética	10
2.1.4 Mediana	11
2.1.5 Amplitude total ou intervalo total	12
2.1.6 Quartis	12
2.1.7 Variância	14
2.1.8 Desvio padrão	16
2.1.9 Coeficiente de variação de Pearson	16
2.1.10 Histograma	17
2.2 CARACTERÍSTICAS DAS VARIÁVEIS REGIONALIZADAS (V.RS)	18
2.3 HIPÓTESES RESTRITIVAS	19
2.4 VARIOGRAMA E SEMIVARIOGRAMA	22
2.5 MODELOS VARIOGRÁFICOS	29
2.5.1 Modelo Esférico (Matheron)	30
2.5.2 Modelo Exponencial (de Formery)	32
2.5.3 Modelo Gaussiano (parabólico)	33
2.5.4 Modelo Potência	34
2.5.5 Modelo Logarítmico (de Wijs)	36
2.5.6 Outros Modelos	37
2.6 ANISOTROPIA	39
2.7 ESTIMATIVA E KRIGAGEM	43
2.7.1 Krigagem Ordinária	46
2.8 MAGNETITA	50
2.8.1 Magnetita e susceptibilidade magnética	52

2.8.2 Magnetita e Flotação	56
3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS	58
3.1 DESCRIÇÃO DOS APLICATIVOS UTILIZADOS	60
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
4.1 DESCRIÇÃO DA GEOLOGIA LOCAL E DO BANCO DE DADOS	63
4.1.1 Área de Estudo	63
4.1.2 Geologia Regional	66
4.1.3 Geologia Local	72
4.1.4 Descrição do Banco de Dados	77
4.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	79
4.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ESPACIAL	85
4.3.1 Variogramas direcionais	85
4.3.2 Modelos variográficos	117
4.4 INTERPOLAÇÃO DOS TEORES	119
4.4.1 Parâmetros de Krigagem	120
4.5 VALIDAÇÃO DA ESTIMATIVA	122
4.5.1 Estatística blocos x amostra	122
4.6 MODELAGEM 3D	126
5. CONCLUSÃO	133
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
7. ANEXOS	138

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Principais componentes da variação espacial.	09
Figura 2	Exemplo de histograma.	18
Figura 3	Exemplo de semivariograma.	24
Figura 4	Feições principais do semivariograma.	25
Figura 5	Amostras regularmente espaçadas em duas dimensões.	25
Figura 6	Ilustração para cálculo do semivariograma a partir de amostras regularmente espaçadas.	26
Figura 7	Parâmetros para o cálculo do semivariograma a partir de amostras irregularmente espaçadas em duas dimensões.	26
Figura 8	Fenômenos limitados e não-limitados.	28
Figura 9	Relação entre covariância e semivariograma.	29
Figura 10	Representação gráfica de modelos transitivos normalizados.	30
Figura 11	Modelo esférico.	31
Figura 12	Modelo exponencial.	32
Figura 13	Modelo de Gauss.	34
Figura 14	Modelo potência.	35
Figura 15	Modelo linear.	36
Figura 16	Modelo logarítmico.	37
Figura 17	Convenções direcionais usadas na geoestatística.	39
Figura 18	Representação gráfica de semivariogramas isotrópicos.	40
Figura 19	Representação gráfica de anisotropia geométrica.	41
Figura 20	Representação gráfica a anisotropia geométrica em duas dimensões.	42
Figura 21	Anisotropia geométrica – modelos sem patamar.	42
Figura 22	Suavização resultante da krigagem.	48
Figura 23	Parametrização de reservas.	49
Figura 24	Estrutura cristalina da magnetita.	50
Figura 25	Magnetita incrustada em rocha.	51
Figura 26	Os diferentes comportamentos magnéticos.	53
Figura 27	Comportamento magnético da magnetita e hematita em função da temperatura.	55
Figura 28	Interface gráfica do SGEMS.	62
Figura 29	Localização geográfica da Mina do Sossego.	64
Figura 30	Localização dos depósitos.	65
Figura 31	Sulfetado de super alto teor.	65
Figura 32	Sulfetado de alto teor.	65
Figura 33	Sulfetado de baixo teor.	66
Figura 34	Minério misto.	66
Figura 35	Oxidado vermelho.	66
Figura 36	Oxidado verde.	66
Figura 37	Localização da Mina do Sossego na Província Mineral de Carajás.	67
Figura 38	Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás.	69
Figura 39	Mapa Geológico do depósito do Sossego, identificando os dois corpos principais, Sequeirinho e Sossego.	75
Figura 40	Cavas da Mina do Sossego.	76
Figura 41	Localização dos furos de sondagem Sequeirinho.	78
Figura 42	Localização dos furos de sondagem Sossego.	78

Figura 43	Histograma SM do Sequeirinho.	80
Figura 44	Histograma SM do Sequeirinho com <i>capping</i> .	82
Figura 45	Histograma SM do Sossego.	83
Figura 46	Histograma SM do Sossego com <i>capping</i> .	84
Figura 47	Variogramas direcionais horizontais para SM do Sequeirinho.	85
Figura 48	Variograma N22,5° horizontal para SM do Sequeirinho.	86
Figura 49	Variograma N45° horizontal para SM do Sequeirinho.	86
Figura 50	Variograma N67,5° horizontal para SM do Sequeirinho.	87
Figura 51	Variograma N90° horizontal para SM do Sequeirinho.	87
Figura 52	Variograma N112,5° horizontal para SM do Sequeirinho.	88
Figura 53	Variograma N135° horizontal para SM do Sequeirinho.	88
Figura 54	Variograma N157,5° horizontal para SM do Sequeirinho.	89
Figura 55	Variograma N180° horizontal para SM do Sequeirinho.	89
Figura 56	Variogramas direcionais verticais na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	90
Figura 57	Variograma dip 10° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	91
Figura 58	Variograma dip 20° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	91
Figura 59	Variograma dip 30° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	92
Figura 60	Variograma dip 40° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	92
Figura 61	Variograma dip 50° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	93
Figura 62	Variograma dip 60° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	93
Figura 63	Variograma dip 70° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	94
Figura 64	Variograma dip 80° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	94
Figura 65	Variograma dip 90° na direção N112,5° para SM do Sequeirinho.	95
Figura 66	Variogramas direcionais verticais na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	96
Figura 67	Variograma dip 10° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	96
Figura 68	Variograma dip 20° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	97
Figura 69	Variograma dip 30° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	97
Figura 70	Variograma dip 40° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	98
Figura 71	Variograma dip 50° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	98
Figura 72	Variograma dip 60° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	99
Figura 73	Variograma dip 70° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	99
Figura 74	Variograma dip 80° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	100
Figura 75	Variograma dip 90° na direção N22,5° para SM do Sequeirinho.	100
Figura 76	Variogramas direcionais horizontais para SM do Sossego.	101
Figura 77	Variograma N22,5° horizontal para SM do Sossego.	102
Figura 78	Variograma N45° horizontal para SM do Sossego.	102
Figura 79	Variograma N67,5° horizontal para SM do Sossego.	103
Figura 80	Variograma N90° horizontal para SM do Sossego.	103
Figura 81	Variograma N112,5° horizontal para SM do Sossego.	104
Figura 82	Variograma N135° horizontal para SM do Sossego.	104
Figura 83	Variograma N157,5° horizontal para SM do Sossego.	105
Figura 84	Variograma N180° horizontal para SM do Sossego.	105
Figura 85	Variogramas direcionais verticais na direção N157,5° para SM do Sossego.	106
Figura 86	Variograma dip 10° na direção N157,5° para SM do Sossego.	107
Figura 87	Variograma dip 20° na direção N157,5° para SM do Sossego.	107

Figura 88	Variograma dip 30° na direção N157,5° para SM do Sossego.	108
Figura 89	Variograma dip 40° na direção N157,5° para SM do Sossego.	108
Figura 90	Variograma dip 50° na direção N157,5° para SM do Sossego.	109
Figura 91	Variograma dip 60° na direção N157,5° para SM do Sossego.	109
Figura 92	Variograma dip 70° na direção N157,5° para SM do Sossego.	110
Figura 93	Variograma dip 80° na direção N157,5° para SM do Sossego.	110
Figura 94	Variograma dip 90° na direção N157,5° para SM do Sossego.	111
Figura 95	Variogramas direcionais verticais na direção N67,5° para SM do Sossego.	112
Figura 96	Variograma dip 10° na direção N67,5° para SM do Sossego.	112
Figura 97	Variograma dip 20° na direção N67,5° para SM do Sossego.	113
Figura 98	Variograma dip 30° na direção N67,5° para SM do Sossego.	113
Figura 99	Variograma dip 40° na direção N67,5° para SM do Sossego.	114
Figura 100	Variograma dip 50° na direção N67,5° para SM do Sossego.	114
Figura 101	Variograma dip 60° na direção N67,5° para SM do Sossego.	115
Figura 102	Variograma dip 70° na direção N67,5° para SM do Sossego.	115
Figura 103	Variograma dip 80° na direção N67,5° para SM do Sequeirinho.	116
Figura 104	Variograma dip 90° na direção N67,5° para SM do Sossego.	116
Figura 105	Modelo variográfico para SM do Sequeirinho.	118
Figura 106	Modelo variográfico para SM do Sossego.	119
Figura 107	Vista superior do modelo de blocos krigado SM Sequeirinho.	120
Figura 108	Vista superior do modelo de blocos krigado SM Sossego.	121
Figura 109	Histograma SM krigado do Sequeirinho.	123
Figura 110	Valores amostrados x valores krigados SM do Sequeirinho.	124
Figura 111	Histograma SM krigado do Sossego.	125
Figura 112	Valores amostrados x valores krigados SM do Sossego.	126
Figura 113	Vista isométrica do modelo de blocos para SM do Sequeirinho.	127
Figura 114	Vista isométrica do modelo de blocos para SM do Sossego.	127
Figura 115	Modelo de blocos para SM do Sequeirinho – bancos 5, 8, 12 e 16.	128
Figura 116	Modelo de blocos para SM do Sequeirinho – seções verticais N-S 72, 94, 108 e 122.	129
Figura 117	Modelo de blocos para SM do Sequeirinho – seções verticais E-W 151, 154, e 157.	129
Figura 118	Modelo de blocos para SM do Sequeirinho – banco 31, seções verticais N-S 94 e E-W 89.	130
Figura 119	Modelo de blocos para SM do Sossego – bancos 1, 4, 8 e 14.	130
Figura 120	Modelo de blocos para SM do Sossego – seções verticais N-S 75, 80, 84, e 90.	131
Figura 121	Modelo de blocos para SM do Sossego – seções verticais E-W 53, 57 e 60.	131
Figura 122	Modelo de blocos para SM do Sossego – banco 43, seções verticais N-S 89 e E-W 57.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo dos furos de sonda da Mina do Sossego.	81
Tabela 2	Resumo da estatística univariada para SM do Sequeirinho.	82
Tabela 3	Resumo da estatística univariada para SM do Sequeirinho com <i>capping</i> .	84
Tabela 4	Resumo da estatística univariada para SM do Sossego.	85
Tabela 5	Resumo da estatística univariada para SM do Sossego com <i>capping</i> .	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BW	<i>Band width</i> (largura de banda).
E	Leste.
F.A	Função aleatória.
KO	Krigagem ordinária.
KS	Krigagem simples
N	Norte.
NE	Nordeste.
NW	Noroeste.
Q25	1° quartil.
Q50	2° quartil.
Q75	3° quartil.
Q99	99° percentil.
S	Sul.
SE	Sudeste.
SM	Suscetibilidade magnética.
SW	Sudoeste.
V.A	Variável aleatória.
V.R	Variável regionalizada.
Vert	Direção vertical do modelo variográfico.
W	Oeste.