

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM MANEJO DO SOLO

FÁBIO RODRIGUES SPIAZZI

ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS
DO SOLO EM ÁREAS CONSTRUÍDAS APÓS MINERAÇÃO DE
CARVÃO NO MUNICÍPIO DE LAURO MULLER, SC

LAGES, SC

2011

FÁBIO RODRIGUES SPIAZZI

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS
DO SOLO EM ÁREAS CONSTRUÍDAS APÓS MINERAÇÃO DE
CARVÃO NO MUNICÍPIO DE LAURO MULLER, SC**

Trabalho de Dissertação apresentado como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre no Curso de Pós-Graduação em Manejo
do Solo da Universidade do Estado de Santa
Catarina - UDESC.

Orientador: Dr. David José Miquelluti

**LAGES, SC
2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA

Renata Weingärtner Rosa – CRB 228/14ª Região
(Biblioteca Setorial do CAV/UDESC)

Spiazzi, Fábio Rodrigues

Análise geoestatística de atributos químicos e físicos do solo em áreas construídas após mineração de carvão no município de Lauro Muller, SC. / Fábio Rodrigues Spiazzi; orientador: David José Miquelluti . – Lages, 2011. 97f.

Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC

1. Geoestatística. 2. Solos construídos. 3. Variabilidade espacial.
I. Título.

CDD – 631.4

FÁBIO RODRIGUES SPIAZZI

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS
DO SOLO EM ÁREAS CONSTRUÍDAS APÓS MINERAÇÃO DE
CARVÃO NO MUNICÍPIO DE LAURO MULLER, SC**

Trabalho de Dissertação apresentado ao curso de Pós-Graduação em Manejo de Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Aprovado em: 25/02/2011

Homologado em: / /2011

Banca Examinadora:

Orientador/presidente: Dr. David José Miquelluti
(UDESC/Lages - SC)

Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Coordenador Técnico do Curso de Mestrado
em Ciência do Solo e Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em Ciências
Agrárias – UDESC/Lages – SC

Membro: Dra. Mari Lucia Campos
UDESC/Lages - SC

Dr. Cleimon Eduardo do Amaral Dias
Diretor Geral do Centro de Ciências
Agroveterinárias – UDESC/Lages - SC

Membro: Dr. Emerson Roberto Schoeninger
(KLABIN/SA)

Lages, (25/02/2011)

A todas as pessoas que acreditam no trabalho em equipe, quando se tem uma equipe.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai e minha mãe por acreditarem que estudar ainda vale à pena

Ao Prof. Dr. David José Miquelluti, orientador desta dissertação, por todo empenho, sabedoria, compreensão e, acima de tudo, paciência.

À Profa. Dra. Mari Lucia Campos, co-orientadora desta dissertação, por sua ajuda, interesse e incansável dedicação. Agradeço principalmente por acreditar que alguém formado em Ciência da Computação seria capaz de trabalhar em uma área agrônômica, juntando conhecimento de ambas as áreas, coisa que poucos ou quase ninguém acreditava no departamento.

A minha namorada Mari Helen Pagani Possamai, que me ajudou muito, dando conselhos e dicas a respeito desse trabalho e de como apresenta-lo. Léli, muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Paulo Cezar Cassol coordenador do programa de pós-graduação em Manejo de Solo na época pelo apoio ao ingresso no programa.

Aos laboratoristas Henrique Doege e Fátima Bitencourt, pela ajuda diária.

Aos colegas de laboratório Priscilla Dors e Karoline Campo pela ajuda nas análises laboratoriais.

Aos demais colegas de mestrado e doutorado, em especial Ariane Andreola, parceira neste trabalho e a Camila Huguen, por me ceder muito material a respeito do tema central deste trabalho.

Ao CNPq que me proporcionou condições financeiras através da bolsa, e a UDESC que através das instalações, equipamentos e profissionais contribuíram com muita importância para a conclusão de mais este estudo.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa Dissertação de Mestrado.

Se você pode sonhar, então você pode fazer.

WALT DISNEY

RESUMO

SPIAZZI, F. R. **Análise Geoestatística de atributos químicos e físicos do solo em áreas construídas após mineração de carvão no município de Lauro Muller, SC.** 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo). Universidade do Estado de Santa Catarina- UDESC. Centro de Ciências Agroveteriárias-CAV. Lages, SC, 2011.

Lauro Muller, SC, caracteriza-se como região de exploração de carvão. No processo de mineração a céu aberto uma grande quantidade de rejeitos é gerada, ocasionando depreciação da terra e poluindo as circunvizinhanças. As operações que visam recuperação dessas áreas nem sempre são conduzidas de maneira adequada. Nesse sentido, os solos construídos topograficamente após a mineração de carvão apresentam características que dependem da variabilidade herdada dos materiais de origem e dos processos construtivos. O objetivo deste trabalho consiste em determinar propriedades químicas e físicas de três áreas situadas na mesma bacia hidrográfica em Lauro Muller, SC. Os atributos analisados foram o pH em água e em CaCl_2 , os teores de P, K, Ca+Mg, Al trocáveis e textura do solo. As amostras foram coletadas em sistema de grade em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm) com espaçamento de 10 m. Procedeu-se a análise exploratória dos dados, e em seguida a análise espacial com a geração de semivariogramas e dos mapas temáticos, com intuito de modelar a dependência espacial. A primeira área, denominada Campo Nativo (CN) é uma área de campo aberto com cobertura de gramíneas, a segunda Mina A2 (A2) sofreu apenas a construção topográfica em 1996, com preenchimento da cava com mistura de rejeito e rochas, arenito, siltito e argilito, e finalmente com plantio de *Eucalyptus* spp., a terceira área, Mina A5 (A5), considerada modelo ideal de recuperação após mineração, foi construída em 2006 utilizando sólum, regolito argiloso e rocha, e revegetada em 2009, com a adição de cama de aves, calcário e posteriormente plantio da gramíneas (*Brachiaria* spp). Os resultados obtidos demonstram a alta variabilidade dos solos construídos, sendo que a A2 e o CN foram as áreas com os teores mais baixos dos elementos, o que indica a baixa fertilidade natural daquela região. A A5 apresentou valores comparativamente maiores que as outras áreas, resultantes da condução dos processos de construção do solo, da calagem e da adubação com cama de aves. A textura média das áreas foi a franco siltosa, argilosa e franco argiloso, respectivamente para CN, A2 e A5. Com a análise espacial foi possível modelar e classificar a dependência espacial e gerar os mapas respectivos. Porém, em alguns casos não houve modelo ajustado, o que denota o efeito pepita puro ou fenômeno com dispersão infinita.

Palavras-chave: Geoestatística. Solo Construído. Variabilidade espacial.

ABSTRACT

SPIAZZI, F. R. **Geostatistics analysis on chemical and physical soil in constructed areas after coal mining in Lauro Müller, SC.** 2011. 97 f. Dissertation (Master's degree in soil management). Santa Catarina State University - UDESC. Centro de Ciências Agroveteriárias - CAV. Lages, SC, 2011.

Lauro Muller, SC, is characterized as a region of coal exploration. In the process of strip mining a large amount of waste is generated, causing depreciation of land and polluting the surroundings. Operations aimed at recovering these areas were not always performed properly. In this sense, topographic constructed soil after mining coal exhibit characteristics that depend on the inherited variability of source materials and construction processes. The objective is to determine chemical and physical properties of three areas within the same watershed in Lauro Muller, SC. The attributes analyzed in this study were pH in water and CaCl_2 , the concentration of P, K, Ca + Mg, Al, and soil texture. The samples were collected in the grid system at two depths (0-20 and 20-40 cm) with spacing of 10 m. It was first performed exploratory data analysis, and then spatial analysis with the generation of semivariograms and the thematic maps, aiming to model the spatial dependence. The first area, called Campo Nativo (CN) is an area of open field with grass cover, the second Mina A2 (A2) has only the construction Topographic in 1996, filling the pit with a mixture of tailings and rock, sandstone, siltstone and mudstone, and finally with *Eucalyptus spp.*, the third area, Mina A5 (A5), considered the ideal model of recovery after mining, was constructed in 2006 using Solum, regolith clay and rock, and replanted in 2009 with the addition poultry litter, limestone and later planting of grasses (*Brachiaria spp.*). The results show the high variability of constructed soil, and the A2 and CN were the areas with lower levels of the elements, which demonstrate the very low fertility of the region. The A5 values were comparatively higher than other areas, resulting from the construction processes of soil, liming and fertilization with poultry litter. The medium texture of the areas was the franco siltosa, argilosa and franco argilosa, respectively, for CN, A2 and A5. With spatial analysis and modeling was possible to classify the spatial dependence and generate their maps. However, in some cases there was no set model, which denotes the pure nugget effect or phenomenon with infinite dispersion.

Keywords: Geostatistics. Constructed Soil. Spatial variability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Localização da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense.....	19
Figura 2: Esquema de mineração a céu aberto	20
Figura 3: Variograma teórico e seus componentes.....	32
Figura 4: Representação gráfica para aplicação da geoestatística e estatística clássica.....	34
Figura 5: Representação gráfica de uma grade de amostragem e a direções usualmente adotadas para análise anisotrópica.	35
Figura 6: Representação esquemática da sequência de cálculos para amostras igualmente espaçadas, tendo como espaçamento 100 m entre os pontos (1º passo).	36
Figura 7: Representação esquemática da sequência de cálculos para amostras igualmente espaçadas, tendo como espaçamento 100m entre os pontos.	36
Figura 8: Representação esquemática da sequência de cálculos para amostras irregularmente espaçadas.	37
Figura 9: Exemplo de aplicações da anisotropia	38
Figura 10: Representação gráfica dos principais modelos adotados para ajuste do semivariograma.	39
Figura 11: Modelos do tipo potência.....	41
Figura 12: Representação do modelo considerado como efeito pepita puro.....	42
Figura 13: Representação dos semivariogramas em diferentes direções (45° e 90°), confirmando a anisotropia.	42
Figura 14: Representação do semivariograma em diferentes direções e não constatada a anisotropia	43
Figura 15: Representações esquemáticas de como os dados são organizados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e suas relações.	47
Figura 16: Localização da área de estudo.....	48
Figura 17: Localização da Bacia do Paraná (a) e da Bacia Carbonífera Catarinense (b).....	49
Figura 18: Formação geológica da região de estudo (em destaque o distrito de Guatá).....	49
Figura 19: Localização geral das áreas de estudo.....	50
Figura 20: Sistema de amostragem em grade de pontos equidistantes em 10 m.....	50
Figura 21: CN e sistema de amostragem em grade.	51
Figura 22: Delimitação do Campo Nativo.....	51

Figura 23: Campo Nativo com cobertura arbustiva de gramíneas	52
Figura 24: A2 e sistema de amostragem em grade.....	52
Figura 25: Superfície de área A2 com fragmentos misturados com o rejeito da mineração de carvão	53
Figura 26: A2 com alguns Eucalyptus spp	53
Figura 27: A5 e sistema de amostragem em grade.....	54
Figura 28: Coleta de solo na área A5	54
Figura 29: Área A5 com superfície revegetada com Braquiária	55
Figura 30: Representação da distribuição e da variabilidade das variáveis pH(água), pH(CaCl ₂) e Al	61
Figura 31: Representação da distribuição e da variabilidade das variáveis K, Ca+Mg e P.	62
Figura 32: Representação da distribuição e da variabilidade das variáveis físicas nas duas profundidades.	64
Figura 33: Semivariogramas ajustados para pH nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita	67
Figura 34: Semivariogramas ajustados para K nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita	68
Figura 35: Semivariogramas ajustados para P nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.....	68
Figura 36: Semivariogramas ajustados para Al nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.	69
Figura 37: Semivariogramas ajustados para Ca+Mg nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.	69
Figura 38: Resultado da interpolação por krigagem ordinária para a variável pH	70
Figura 39: Resultado da interpolação por krigagem ordinária para a variável K	71
Figura 40: Resultado da interpolação por krigagem ordinária para a variável P	71
Figura 41: Resultado da interpolação por krigagem ordinária para a variável Al	72
Figura 42: Resultado da interpolação por krigagem ordinária para a variável Ca+Mg	73

Figura 43: Semivariogramas ajustados para Argila nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.	74
Figura 44: Resultado da interpolação por krigagem ordinária para a variável Argila	74
Figura 45: Representação da distribuição e da variabilidade da profundidade, variando de 10-40 cm, (a) distribuição estatística por box plot, (b) mapa 3D dos interpolado dos pontos amostrados.	75
Figura 46: Semivariogramas ajustados para Profundidade na área A2, com profundidade variando de 10-40 cm, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.	76
Figura 47: Resultado da interpolação por krigagem ordinária para a variável profundidade	76
Figura 48: Tela do sistema de informação geográfica construído neste trabalho, para A2 ,tendo de plano de fundo a variável Al de 0-20 cm.....	77
Figura 49: Resultado da validação cruzada para o pH de 0-20 cm em CN.....	92
Figura 50: Resultado da validação cruzada para o pH de 0-20 cm em A5.....	92
Figura 51: Resultado da validação cruzada para o pH de 20-40 cm em A5.....	92
Figura 52: Resultado da validação cruzada para o K de 0-20 cm em CN (escala 10^{-1}).	92
Figura 53: Resultado da validação cruzada para o K de 0-20 cm em A2 (escala 10^{-1}).	93
Figura 54: Resultado da validação cruzada para o K de 0-20 cm em A5 (escala 10^{-1}).	93
Figura 55: Resultado da validação cruzada para o K de 20-40 cm em A5 (escala 10^{-1}).	93
Figura 56: Resultado da validação cruzada para o P de 0-20 cm em CN.....	93
Figura 57: Resultado da validação cruzada para o P de 20-40 cm em CN.....	94
Figura 58: Resultado da validação cruzada para o P de 0-20 cm em A5 (escala 10^{+1}).	94
Figura 59: Resultado da validação cruzada para o P de 0-20 cm em A5 (escala 10^{+1}).	94
Figura 60: Resultado da validação cruzada para o Al de 0-20 cm em CN (escala 10^{+1}).	94
Figura 61: Resultado da validação cruzada para o Al de 20-40 cm em CN (escala 10^{+1}).	95
Figura 62: Resultado da validação cruzada para o Al de 0-20 cm em A2 (escala 10^{+1}).	95
Figura 63: Resultado da validação cruzada para o Al de 0-20 cm em A5.	95
Figura 64: Resultado da validação cruzada para o Al de 20-40 cm em A5 (escala 10^{+1}).	95
Figura 65: Resultado da validação cruzada para o Ca+Mg de 0-20 cm em A5 (escala 10^{+1}). ..	96
Figura 66: Resultado da validação cruzada para o Ca+Mg de 20-40cm em A5 (escala 10^{+1}). ..	96
Figura 67: Resultado da validação cruzada para a Argila de 0-40 cm em A2(escala 10^{+2}).	96
Figura 68: Resultado da validação cruzada para a Argila de 20-40 cm em A5(escala 10^{+2}). ..	96
Figura 69: Resultado da validação cruzada para a Argila de 10-40 cm em A2 (escala 10^{+1}). ..	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise descritiva exploratória das variáveis nas três áreas em estudo na profundidade de 0-20 cm.	58
Tabela 2: Análise descritiva exploratória das variáveis nas três áreas em estudo na profundidade de 20-40 cm.	59
Tabela 3: Análise exploratória geoestatística, com os parâmetros do semivariograma ajustado para as três áreas de estudo e nas duas profundidades.	67
Tabela 4: Análise exploratória geoestatística, com os parâmetros do semivariograma ajustado para as três áreas de estudo e nas duas profundidades do teor de Argila.	73
Tabela 5: Análise exploratória geoestatística, com os parâmetros do semivariograma ajustado para as três áreas de estudo e nas duas profundidades.	75
Tabela 6: Análise exploratória geoestatística, com os parâmetros do semivariograma ajustado para as três áreas de estudo e nas duas profundidades da profundidade.	75
Tabela 7: Resumo das estatísticas dos erros da validação cruzada	91

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.1 O CARVÃO E A SUA MINERAÇÃO	18
1.2 A MINERAÇÃO DE CARVÃO A CÉU ABERTO	19
1.3 O IMPACTO AMBIENTAL DA MINERAÇÃO DE CARVÃO.....	20
1.3.1 Solos Construídos Topograficamente.....	23
1.3.2 Variabilidade de Solos Construídos	24
1.4 GEOESTATÍSTICA.....	24
1.4.1 Conceitos e Definições	25
1.4.1.1 A Modelagem Probabilística e a Estacionariedade	26
1.4.1.2 Hipóteses	28
1.4.1.3 O Semivariograma.....	31
1.4.1.3.1 Semivariograma Para Amostra Regularmente Espaçadas.....	34
1.4.1.3.2 Semivariograma Para Amostra Irregularmente Espaçadas	37
1.4.1.3.3 Modelos de Semivariograma Teórico.....	38
1.4.1.3.4 Anisotropia	42
1.4.1.3.5 Validação do Modelo.....	43
1.4.1.4 Krigagem Ordinária.....	43
1.4.1.5 Validação Cruzada.....	46
1.5 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	47
2 MATERIAL E MÉTODOS	48
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO	48
2.2 LOCAL E SISTEMA DE AMOSTRAGEM.....	49
2.1.1 Caracterização das Áreas em Estudo.....	50
2.1.1.1 Área de Campo Nativo (CN).....	51
2.1.1.2 Área 2	52
2.1.1.3 Área 5	53
2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	55
2.3.1 Análise Exploratória	55
2.3.2 ANÁLISE ESPACIAL	55
2.4 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS	57
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DESCRITIVA	58
3.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	65
3.2.1 Análise Semivariográfica	65
3.2.1.1 Propriedades Químicas	65
3.2.1.2 Propriedades físicas	73
3.2.1.3 Análise da variação da profundidade na área A2	75
3.2.1.4 Sistema de informações geográficas.....	76
4 CONCLUSÕES.....	78

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE	91

INTRODUÇÃO

Os modelos atuais de desenvolvimento tecnológico das sociedades modernas requerem grande número de matérias-primas para sua reprodução, destacando-se as fontes energéticas minerais, que se constituem como bases imprescindíveis aos seus processos produtivos industriais, neste cenário o carvão destaca-se como importante fonte energética para a humanidade (NEVES e SAMBUGARO, 2006). Porém os impactos causados pela exploração desse recurso geram inúmeras modificações nos atributos químico-físicos do solo, além do impacto social na região e alteração na paisagem.

Com o advento da informática e o domínio das técnicas agrícolas juntamente com a globalização crescente nos últimos anos, o cenário que se estabelece, é o da imposição do mercado agrícola nacional à obtenção de uma maior sustentabilidade, impulsionando o desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias que dão suporte a essa sustentabilidade.

O conhecimento da variabilidade espacial de atributos do solo constitui-se num importante meio de diagnóstico de qualidade sob o ponto de vista da fertilidade, propicia a utilização de práticas adequadas de manejo e a condução de políticas de uso e conservação desse importante recurso natural não renovável.

A variabilidade espacial diz respeito à variação das propriedades de algum atributo que possa ser espacializado, ou seja, possui coordenadas. Essas coordenadas podem ser atribuídas arbitrariamente ou podem ser as próprias coordenadas geográficas do ponto amostrado onde o atributo será mensurado (ORTIZ, 2002; VIERA, 2000).

A variabilidade espacial pode ser classificada em duas categorias: sistemática e ao acaso. Wilding e Drees (1983) descrevem a variabilidade sistemática como sendo as mudanças graduais nos valores da propriedade que ocorrem em função dos fatores de formação ou de processos que atuam dentro da escala de observação. Já a variabilidade ao acaso constitui-se nas mudanças das propriedades do solo que não podem ser relacionadas a uma causa conhecida, podendo ser decorrência da litologia diferencial, intensidade do intemperismo, erosão, fatores biológicos, hidrologia diferencial, erros analíticos e de amostragem e por último, ação antrópica. Além disto, parte da variabilidade que se credita ao acaso pode ser devida à dependência espacial (GONÇAVES et al, 2001).

Os solos que de alguma forma sofreram influência de alguma prática antrópica muitas vezes têm seu potencial produtivo alterado. Especialmente solos construídos topograficamente após a mineração de carvão têm suas características químico-físicas

alteradas radicalmente. Nesse sentido, torna-se fundamental o conhecimento da nova forma de disposição do solo, e principalmente sua nova configuração química e física.

Os procedimentos usados no início do século XX baseavam-se na estatística clássica ou de Fisher, que utilizava parâmetros como a média e o desvio padrão para representar um fenômeno, assumindo a hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias (VIEIRA, 2000). Trabalhando com dados de concentração de ouro, Krige (1951) concluiu que somente a informação dada pela variância é insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para tal é necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surge o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial.

A geoestatística provém de ferramentas e modelos, que permitem a partir de um conjunto aleatório de elementos amostrais conhecer a continuidade das variáveis de interesse em toda a área de estudo, demonstrando a variação espacial do fenômeno por intermédio de mapas de variabilidade e probabilidade (GUEDES, 2008; BURROUGH, 1987). A base da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem mais distantes (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989). Os princípios do método advêm da teoria das variáveis regionalizadas (V.R.) proposta por Matheron (1963, 1971).

Segundo Guerra (1988), a partir das V.R., representadas na prática por certa quantidade de dados numéricos disponíveis, se obtêm as informações sobre as características qualitativas ligadas à estrutura do fenômeno natural que elas representam, tais características são: a localização, a continuidade e a anisotropia.

Deste modo a geoestatística se propõe a estudar dois objetivos principais: extrair da aparente desordem dos dados disponíveis, uma imagem da variabilidade dos mesmos e uma medida da correlação existente entre os valores tomados em dois pontos do espaço, separados por um vetor $\mathbf{h}$ em que $|\mathbf{h}|$ = distância entre esses dois pontos, as quais são objetivos da análise estrutural, que é feita por meio do semivariograma; e, medir a precisão de toda a predição ou estimativa, que é obtida através da krigagem (ORTIZ, 2002).

Muitas vezes a amostragem em solos gera uma quantidade elevada de informações, ainda mais se esses dados são amostrados na forma de grades e em profundidades diferenciadas. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são capazes de gerenciar esse volume de informação de maneira eficiente e segura, além de possibilitarem um leque considerável de ferramentas, inclusive de geoestatística, análise exploratória dos dados, seu

gerenciamento em banco de dados geográfico e a apresentação dos mesmos nos mais diversos formatos.

Conhecer como o ambiente funciona é mais valioso do que apenas saber como ele se parece, por que tal conhecimento pode ser usado para se fazer previsões. Os SIGs são os responsáveis por prover as ferramentas para que isso seja possível (LONGLEY, 2002).

O objetivo geral deste trabalho é analisar de forma exploratória e avaliar geoestatisticamente alguns atributos químicos e físicos do solo em áreas construídas topograficamente após mineração de carvão e em um campo nativo.

Como objetivos específicos, constatar até que ponto a geoestatística é aplicável nas condições das áreas em estudo, para se modelar o comportamento espacial da variável através de uma função definida pelo semivariograma e a partir disto, gerar um mapa temático de todas as áreas de estudo para cada uma das variáveis analisadas, e estabelecer um sistema de amostragem adequado para cada situação, garantido assim a independência em amostragens futuras nessas áreas.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 O CARVÃO E A SUA MINERAÇÃO

Segundo o *World Coal Institute* (2010), o carvão provê cerca de 26.5% de toda a energia primária do planeta, da qual, 41.5% é para a eletricidade. As reservas de carvão estão disponíveis em quase toda a extensão do globo, recobrindo cerca de 70 países. Com os níveis atuais de produção, estima-se que essas reservas durem ainda 119 anos. O Brasil participa com apenas 0,2% na produção mundial de carvão mineral. Segundo Monteiro (2004) as reservas brasileiras, além de pouco expressivas, são de baixa qualidade, o que dificulta tanto o seu aproveitamento como fonte de energia, como para fins siderúrgicos.

No Brasil, as jazidas de carvão localizam-se principalmente nos três estados do Sul. Há milhões de anos, em uma parte da região hoje ocupada pelos estados do Paraná, de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, havia ambientes costeiros com deltas, lagunas e um clima sazonal temperado (MONTEIRO, 2004; SANTA CATARINA, 1990). A maior parte dos atuais continentes ainda encontrava-se unida no supercontinente Gondwana, quando camadas sedimentares depositaram-se numa grande área deprimida, hoje chamada Bacia Sedimentar do Paraná. Ali, ainda no Período Permiano da Era Paleozóica, entre 240 e 280 milhões de anos atrás, formaram-se as jazidas de carvão (MONTEIRO, 2004; SCHIBE, 2002).

As primeiras atividades de mineração no Brasil de carvão foram iniciadas na década de 1860 por famílias de ingleses trazidas pelo engenheiro de minas James Johnson, que obteve a primeira concessão abrindo a mina de Arroio dos Ratos no Rio Grande do Sul (GERMANI, 2002). O Estado de Santa Catarina atualmente produz 50% do carvão nacional (WEISS, 2004). A exploração é realizada tanto em minas subterrâneas como a céu aberto. Ambas acarretam problemas ambientais, pois modificam a estrutura do meio natural, pela disposição inadequada dos rejeitos da mineração, causando contaminação de águas superficiais e subterrâneas, promovem alterações na atmosfera ao redor das minas pela geração de gases e poeiras e perda do solo fértil (SANCHEZ e FORMOSO, 1990).

As reservas de carvão do tipo betuminoso e sub-betuminoso, que constituem as reservas brasileiras mais significativas, distribuem-se pelo flanco leste da Bacia Sedimentar do Paraná. Em Santa Catarina essas reservas concentram-se numa área alongada no sentido norte/sul, situada entre os municípios de Araranguá e Lauro Müller, com aproximadamente 70 km de comprimento por 15-20 km de largura (Figura 1) (BRASIL, 1987; BELOLLI, 2002 et al). As reservas brasileiras totalizam 32 bilhões de toneladas de carvão "*in situ*". Deste total, o

estado do Rio Grande do Sul possui 89,25%, Santa Catarina 10,41%, Paraná 0,32% e São Paulo 0,02% (CPRM, 2010).

As camadas de carvão mais importantes da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense são localizadas no topo da Formação Rio Bonito e Palermo, principalmente no município de Siderópolis. Nesta região destacam-se as camadas de carvão Barro Branco, Irapuá e Bonito Inferior, devido à constância lateral, maior espessura e reabilitação de carvão metalúrgico (BRASIL, 1987).

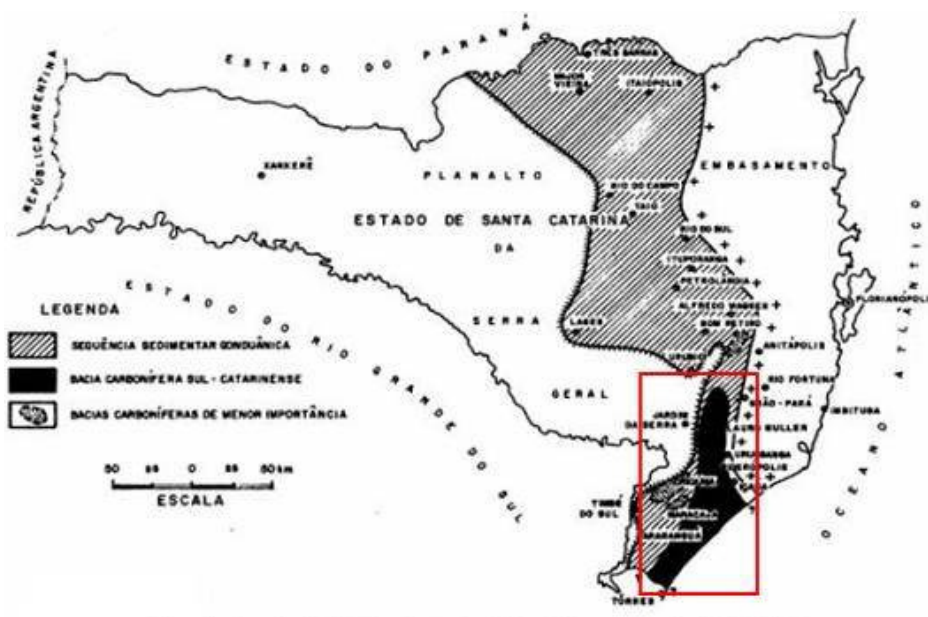


Figura 1 – Localização da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense.
Fonte: Brasil, 1987.

1.2 A MINERAÇÃO DE CARVÃO A CÉU ABERTO

De acordo com o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPN) a lavra a céu aberto consiste nas operações de remoção da cobertura de material estéril e a extração da camada de carvão descoberta, devendo-se ter conhecimento prévio das características da camada de carvão descoberta, das características de materiais da cobertura a ser removida, a relação estéril/minério, a topografia de superfície, a espessura e a quantidade de camadas de carvão, a produção prevista, equipamento disponível, energia elétrica, presença de águas, cuidados com a preservação do meio ambiente dentre outras (BRASIL, 1987).

Nas minerações a céu aberto o método mais frequentemente utilizado é classificado como “Striping Mining” (Figura 2), que consiste na abertura de cortes de 80 m de largura e 200 a 1500 m de comprimento, com variações que dependem das diferentes maneiras de

decapeamento em função do equipamento utilizado. Normalmente a cobertura e o carvão são lavrados em sequência de cortes. O estéril removido de um corte é depositado dentro do vazio do corte anterior. As máquinas utilizadas no decapeamento são escavadeiras do tipo “Dragline” ou “Shovel” escavadeiras “Bucktwell” e ainda equipamentos rodoviários como o “Moto-Scrapers” são utilizados quando o inerte da cobertura é de natureza argilosa (BRASIL,1987).

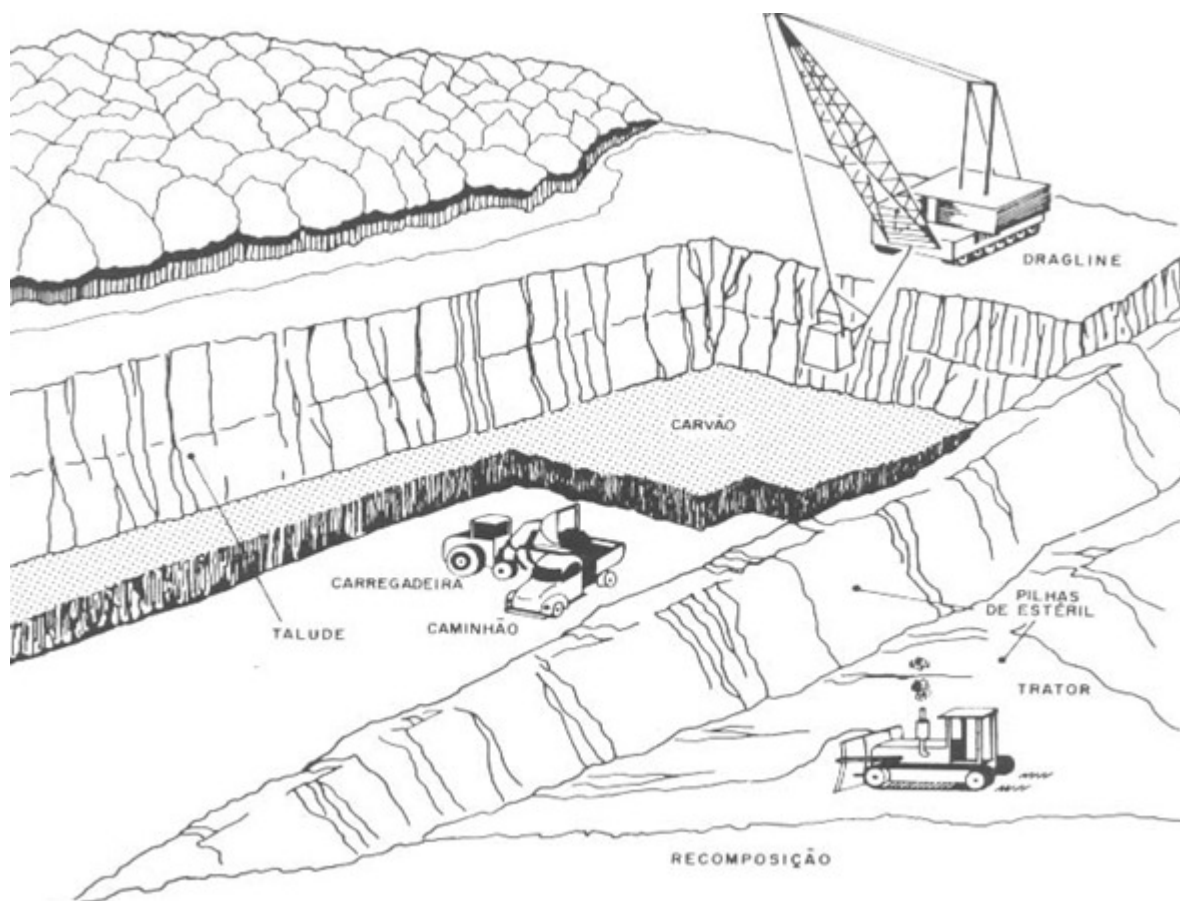


Figura 2 - Esquema de mineração a céu aberto
Fonte: BRASIL, 1987.

1.3 O IMPACTO AMBIENTAL DA MINERAÇÃO DE CARVÃO

O carvão mineral é uma rocha combustível, contendo elevados teores de carbono (50% a 95%), formada pela preservação de matéria vegetal por compactação, variação de temperatura e pressão. Ocorre geralmente em camadas estratificadas, que vão de poucos centímetros a centenas de metros de espessura, e sua cor varia do marrom ao preto (MONTEIRO, 2004). Ainda segundo este autor o carvão brasileiro possui um alto conteúdo de impurezas (teor de cinzas em torno de 40 e 55% e de Enxofre geralmente entre 1 e 2,5%, chegando a 5,5%) e um baixo poder calorífico (normalmente entre 3.000 e 4.500 cal/g).

A exploração do carvão afeta a qualidade do solo agrícola. Em Santa Catarina nos municípios de Siderópolis, Urussanga, Criciúma e Lauro Müller existiam até 1990, cerca de 2100 ha de terras improdutivas, direta ou indiretamente afetadas pelas atividades de mineração (SANTA CATARINA, 1990). Essa exploração gera uma grande quantidade de rejeitos, e por muitos anos esses foram depositados próximos aos locais de mineração em pilhas ou barragens, gerando depreciação da terra e poluição das circunvizinhanças desses empreendimentos minerários (SPIAZZI et al., 2009).

Os resultados da mineração, associados à competição pelo uso e ocupação do solo, geram muitos problemas, não só ambientais, mas também os chamados sócio-ambientais, principalmente devido a falta de metodologias de intervenção, que reconheçam a pluralidade dos interesses envolvidos. Além disso, outro fator importante é a poluição dos mananciais hídricos, das regiões próximas às jazidas, onde o mineral é explorado (MENEZES, 2009; FARIAS, 2002).

Mudroch et al. (2002) estudaram a prática da mineração de carvão a céu aberto entre os anos de 1981 e 1989 na Eslováquia e observaram inúmeros impactos ao meio ambiente da região, como contaminação das águas, mudança nas características químicas do solo, afetando cerca de 110 propriedades agrícolas privadas aos arredores da mina. Na região sul do Brasil inúmeros estudos destacam a baixa concentração natural de nutrientes no solo e os efeitos maléficos da mineração de carvão, como acidificação do solo, lixiviação de cátions básicos, desagregação do solo entre outros (CAMILLO, et al., 2003; LUNARDI NETO, et al., 2008; CAMPOS et al., 2003; GAIVIZO, et al., 2002). Seybold et al. (2004) em um estudo sobre solo construído após a mineração de carvão em Indina-EUA constataram a baixa fertilidade, baixos teores de matéria orgânica, compactação do solo, inadequada profundidade de enraizamento, baixa capacidade de retenção de água e baixo pH.

Em Siderópolis, Pompêu et al. (2004) estudando a bacia Fiorita que sofreu impacto devido a exploração de carvão destacaram a redução da qualidade da água em direção à parte baixa da bacia, com diminuição do pH e elevação nos valores de acidez total, condutividade elétrica, e nos teores de sólidos totais, sulfato, alumínio, cálcio, ferro II e total, magnésio e manganês. Segundo os autores, esses dados sugerem o efeito da concentração de metais o que de acordo com Resolução Conama 20 de 1986 comprometem a qualidade da água e restringe o seu uso.

Os problemas gerados pela mineração, inclusive em várias regiões metropolitanas no Brasil, devido à expansão desordenada e sem controle dos loteamentos nas áreas limítrofes, exigem uma constante evolução na condução dessa atividade para evitar situações de conflito.

Para as empresas, existe uma tendência de ver os impactos causados pela mineração unicamente sob as formas de poluição que são objeto de regulamentação pelo poder público, que estabelece padrões ambientais: poluição do ar e das águas, vibrações e ruídos (SÁNCHEZ 1994).

Os diferentes tipos de lavra (conjunto de processos objetivando o aproveitamento de jazidas, desde a extração até o beneficiamento das mesmas) (BRASIL, 1967), utilizados pelas empresas mineradoras, aliados às dificuldades na fiscalização, conduzem a deficiências no processo de construção do solo, resultando na contaminação das camadas superficiais com resíduos do carvão (CAMPOS et al., 2003).

O DNPM lista, de maneira geral, os principais agravantes no que se refere a integridade do meio ambiente, principalmente gerada pelos rejeitos sólidos e efluentes líquidos das unidades de beneficiamento, do transporte e da utilização do carvão pelos diversos segmentos industriais:

- Comprometimento da rede hidrográfica, quanto à qualidade e usos;
- Assoreamento de rede hidrográfica, causado pela deposição de finos e ultrafinos de carvão/rejeito, acentuando a turbidez e as concentrações de sólidos decantáveis;
- Águas sulfurosas e ácidas procedentes das minas subterrâneas, a céu aberto e dos depósitos de rejeitos piritosos que poluem águas de drenagem pluvial e de infiltração;
- As disposições de rejeitos em locais e formas inadequadas causam a degradação de extensas áreas rurais e urbanas;
- Lavra a céu aberto, ocasiona a remoção do solo/vegetal, nas operações de descobertura da camada de carvão;
- A pirita existente nos rejeitos provenientes do beneficiamento do carvão sofre oxidação em consequência do contato com o ar e a água, liberando ao meio ambiente, gases sulfurosos, compostos de ferro e ácido sulfúrico.

No processo de lavra do carvão um dos principais componentes do rejeito é a pirita (FeS_2) que, em contato com o oxigênio atmosférico, se oxida e desencadeia uma reação de acidificação. Esta, por sua vez, provoca a dissolução de minerais e eleva a concentração de metais a níveis tóxicos e, conseqüentemente, acidifica o solo e diminui sua capacidade fértil, inibindo o crescimento de raízes e reduzindo o número de microrganismos fixadores de nitrogênio (SOARES et al., 2006; BARNHISEL et al., 1982; TAYLOR et al., 1992).

A intensa acidificação produzida, caracterizada por valores de pH inferiores a 3,5, determina a dissolução de minerais aluminossilicatados, bem como a formação de novas fases minerais a partir dos produtos dessa dissolução (KÄMPF et al., 1997; INDA et al., 2010). Esses vários fatores de natureza física e química do rejeito carbonífero limitam o estabelecimento vegetal e restringem a reabilitação das áreas de mineração. Gaivizzo et al. (2002) ressaltam que o estabelecimento e a manutenção da comunidade de plantas após a recomposição topográfica e a cobertura do rejeito carbonífero com uma camada de solo podem minimizar em parte os impactos causados ao ambiente pelas áreas de mineração. A redução do fluxo de ar e água diminui a produção da drenagem ácida e os riscos de combustão espontânea das pilhas, além de promover a estabilização da superfície, controlando os processos erosivos e a sedimentação de partículas nos mananciais da região (DANIELS, 1996 apud CAMPOS et al., 2010).

Lopes et al. (2004) demonstraram que o processo de contaminação de solos, devido à degradação ambiental em áreas de mineração a céu aberto para extração de carvão é um sério problema na região da Depressão Carbonífera Catarinense. A mitigação destes impactos depende da efetividade das medidas de reabilitação implantadas nessas áreas, as quais, por sua vez, devem ser propostas com base em diagnóstico ambiental preciso que possibilite o entendimento dos processos geoquímicos atuantes e a caracterização estrutural do local pesquisado juntamente com o conhecimento da nova distribuição espacial dos atributos do solo (KLEIN, 2006).

1.3.1 Solos Construídos Topograficamente

No processo de reabilitação de áreas de mineração de carvão a céu aberto, são utilizados o solo e as litologias subjacentes às camadas de carvão para a construção topográfica da paisagem, devendo ser proporcionadas, ao solo assim construído, condições para desenvolvimento da vegetação (PINTO, 1997).

Estes solos construídos apresentam características que dependem da variabilidade herdada dos materiais de origem, e dos diferentes processos construtivos, determinando a espessura e grau de compactação das camadas distintas, bem como a diferente disposição dos materiais, aos quais os processos pedogenéticos irão se sobrepor (KÄMPF et al., 1997; SCHAFER, 1980; CAMPOS et al., 2003).

Ainda segundo Campos et al. (2003) o conhecimento dessas variações é fundamental como subsídio para definição de esquemas mais apropriados de amostragem, para explicação

das respostas diferenciadas obtidas após implantação de espécies vegetais e para melhor definição de opções de uso e manejo dessas áreas.

1.3.2 Variabilidade de Solos Construídos

A variabilidade natural do solo é perturbada durante a mineração de carvão a céu aberto, alterando o equilíbrio estabelecido durante anos. Durante as escavações, as camadas e horizontes de solo deveriam ser separados para melhorar o processo de construção, entretanto em muitas minas isto não é feito, originando áreas construídas com características indesejáveis (elevada acidez do solo, desestruturação física, baixa atividade biológica etc.) (LUNARDI NETO, 2006). Resultando dessa maneira em uma alteração tanto nas características físico-químicas, quanto na variabilidade espacial dos atributos do solo.

O estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo é importante para o levantamento e classificação de solos, determinação de áreas experimentais, avaliação da fertilidade, padronização de procedimentos de amostragem, coleta de dados e extrapolação de resultados (SOUZA et al., 1992). A análise de diversas situações ambientais (situações de riscos, potenciais de uso, de necessidades de proteção, de impacto, de ordenamento geoeconômico, de zoneamento ambiental, entre outras) permite caracterizar um ambiente de forma diretamente voltada para a utilização racional dos recursos físicos, bióticos e socioeconômicos nele disponíveis (SILVA, 2007).

Quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade (que possa ser determinado pelo semivariograma), expresso pela dependência espacial, deve-se adotar procedimentos estatísticos que levem em conta esta continuidade (VIEIRA, 2000). Segundo Campos et al. (2003) as operações de mineração a céu aberto tendem a misturar materiais de várias partes da coluna geológica, potencializando a variabilidade local. Essa é a razão por que as propriedades dos solos construídos após mineração de carvão variam muito em escalas de distâncias menores do que as do solo natural (SCHAFFER et al., 1980), determinando que em cada local se faça um estudo específico.

1.4 GEOESTATÍSTICA

A geoestatística é o ramo da estatística aplicada que desenvolve e aplica modelos para representar fenômenos naturais cujas propriedades variam em função da localização espacial dos pontos de observação (MATHERON, 1962). O desenvolvimento da geoestatística nos

anos 60 foi resultado da necessidade de se ter um método para avaliação dos depósitos de reservas minerais (GOOVAERTS, 1997; VIEIRA, 2002).

Modelos geoestatísticos provêm soluções para questões como: determinação do grau de expansão do depósito mineral, determinação de áreas de extração, otimização do padrão de amostragem, dentre outras. Dos procedimentos geoestatísticos, a krigagem é aquele que possibilita a inferência de valores, a partir de amostras pontuais de um atributo espacial (BRANDÃO, 2001).

Os métodos geoestatísticos possibilitam a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, por considerarem a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. Além disso, esse estudo pode ser feito em áreas de quaisquer tamanhos, abrangendo diversas aplicações, como a hidrologia, sensoriamento remoto, prospecção de petróleo, ciências ambientais, solos e etc.

No entanto, antes da aplicação de técnicas de análise espacial deve-se realizar uma análise exploratória utilizando-se histogramas, gráficos de dispersão e outros que permitam identificar “outliers”, forma da distribuição, escolha da análise a ser aplicada, decisão do tipo de estacionariedade que pode ser assumida, caracterização da variabilidade e outros (ORTIZ, 2002).

1.4.1 Conceitos e Definições

Para a aplicação dos procedimentos geoestatísticos é fundamental uma análise exploratória prévia e a compreensão dos instrumentos e conceitos utilizados, tais como: modelagem probabilística e estacionariedade, descrição e modelagem da estrutura da variabilidade espacial e verificação da distribuição espacial para cada uma das variáveis, obtendo-se mapas que representam os valores das propriedades em estudo na área (ORTIZ, 2002).

Segundo Bailey e Gattrel (1995) a ideia da análise exploratória de dados espacializados é aprofundar a compreensão do processo que os deu origem, ou seja, avaliar evidências de hipóteses a ele relacionadas, ou ainda, tentar prever valores em áreas onde as observações não estão disponíveis.

1.4.1.1 A Modelagem Probabilística e a Estacionariedade

As deduções a seguir e os conceitos apresentados, basearam-se nos trabalhos e textos de Viera (2002, 1995, 1983), Isaaks & Srivastava (1989), Guerra (1988), Costa & Filho (2004), Goovaerts (1997) e Ortiz, 2002.

Considere-se um campo de área S , para o qual se tem um conjunto de valores medidos $z(x_i)$, $i=1, \dots, n$, onde x_i identifica uma posição no espaço ou no tempo, e representa pares de coordenadas (x_i, y_i) . Para uma dada posição fixa x_k , cada valor medido da variável em estudo, $z(x_k)$, pode ser considerado como uma realização de uma variável aleatória, $Z(x_k)$. A variável regionalizada $Z(x_k)$, para qualquer x_i dentro da área S , por sua vez, pode ser considerada uma realização do conjunto de variáveis aleatórias $Z(x_i)$, para qualquer x_i dentro de S .

A teoria das variáveis regionalizadas por considerar a localização, continuidade e anisotropia (direção) no tratamento dos dados é importante neste contexto. Quando uma variável aleatória assume diferentes valores em função da localização em que é amostrada no campo, caracteriza-se uma variável regionalizada, e considerando-se o conjunto de todas as possíveis realizações da variável aleatória nos diferentes locais de amostragem tem-se uma função aleatória (MATHERON, 1963).

Uma variável aleatória possui dois aspectos, o primeiro é a aleatoriedade, ou seja, existe uma irregularidade e uma variação imprevisível nos valores de um ponto para outro no campo, o segundo é estrutural, e trata das relações existentes entre os pontos no espaço (dependência), motivado pela gênese do fenômeno.

Viera (2002) define que, se a função aleatória $Z(x_i)$ tem valores esperados $E\{Z(x_i)\} = m(x_i)$ e $E\{Z(x_i+h)\} = m(x_i+h)$ e variâncias $Var\{Z(x_i)\}$ e $Var\{Z(x_i+h)\}$, respectivamente, para os locais x_i e x_i+h , e qualquer vetor h , então, a covariância $C(x_i, x_i+h)$ entre $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ é definida por:

$$C(x_i, x_i+h) = E \{Z(x_i) Z(x_i+h)\} - m(x_i) m(x_i+h) \quad (1)$$

Em que,

C = Covariância

E = Operador Esperança

m = Média

O variograma $2\gamma(x_i, x_i+h)$, ou seja, para posição inicial mais o seu incremento (h), que é a distância entre os pontos, é definido por:

$$2 \gamma(x_i, x_i+h) = E \{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}^2 \quad (2)$$

A variância da função aleatória $Z(x_i)$ sem considerar a distância que separa os pontos pode ser definida por:

$$\begin{aligned} \text{VAR} \{Z(x_i)\} &= E \{Z(x_i) Z(x_i+0) - m(x_i) m(x_i+0)\} = \\ &= E \{Z^2(x_i) - m^2(x_i)\} = C(x_i, x_i) \end{aligned} \quad (3)$$

Da mesma forma que para posição inicial, define-se também a variância da função aleatória $Z(x_i+h)$, que leva em consideração a distância entre os pontos, ou seja, basta acrescentar o vetor h aos termos de $E \{Z^2(x_i) - m^2(x_i)\}$, como segue:

$$E \{Z^2(x_i+h) - m^2(x_i+h)\} = C(x_i+h, x_i+h) \quad (4)$$

Duas características principais limitam a modelagem de um fenômeno natural espacialmente distribuído por variáveis aleatórias. Um delas é a impossibilidade de se repetir o experimento, pois se fosse possível fazê-lo, obter-se-iam outras realizações da mesma função aleatória, a qual deste modo seria caracterizada por uma distribuição de probabilidades. Porém como se tem apenas uma realização não se pode deduzir a lei de probabilidades (ORTIZ, 2002; LANDIN, 2003).

A cada nova realização (mensuração), outras coordenadas são associadas a este novo ponto, diferentes de qualquer outro. Segundo Valente (1989) apud Ortiz (2002), na prática, uma variável aleatória não é medida em pontos no espaço, conforme conceituados pela geometria euclidiana, mas sim em suportes de dimensões finitas e perfeitamente determinadas. Por exemplo, para um teor qualquer de um elemento no solo, o suporte é o seu volume de amostra retirada e analisada. Portanto, caso mude o suporte obtém-se outra regionalização diferente da primeira.

Existem algumas hipóteses a serem consideradas e ao menos uma delas deverá ser satisfeita antes de se fazer qualquer aplicação em geoestatística (VIEIRA, 2002).

1.4.1.2 Hipóteses

Ergodicidade: a esperança referente a média de todas as possíveis realizações (pontos amostrados) da variável é igual a média de uma única realização, dentro da área estudada. A ergodicidade implica que uma única realização se comporta, no espaço, com a mesma função densidade de probabilidade que o conjunto de possíveis realizações. Assim, com a observação da variação no espaço de uma propriedade, é possível determinar a função densidade de probabilidade para todas as realizações. Isto é chamado de inferência estatística da função densidade de probabilidade da função regionalizada $Z(x_i)$. Um fenômeno que é estacionário e ergódico é considerado homogêneo, ou uniforme (COSTA e FILHO, 2004).

Estacionariedade: Na região em que se pretende fazer as estimativas o fenômeno é descrito como homogêneo (LANDIN, 2003). De acordo com o número k de momentos estatísticos que são constantes, a estacionariedade é chamada de ordem k . Em geoestatística a estacionariedade de ordem 2 é o que se requer (VIEIRA, 2002). A estacionariedade diz respeito então à continuidade da função aleatória $Z(x_i)$. Assume-se que as propriedades estatísticas (média, variância, covariância, momentos de maior ordem) são estacionárias no espaço, isto é, não variam com a translação (posição), ou seja, a função aleatória $Z(x_1)$, $Z(x_2)$, $Z(x_3)$, ..., $Z(x_n)$ possui a mesma lei de distribuição de probabilidade que $Z(x_{1+h})$, $Z(x_{2+h})$, $Z(x_{3+h})$, ..., $Z(x_{n+h})$.

Tem-se, portanto,

$$E[Z(x_i)] = E[Z(x_{i+h})] = E[Z(x_{i+2h})] \dots = m \quad (5)$$

$$\begin{aligned} C(h) &= E\{[Z(x_i) - m] * [Z(x_{i+h}) - m]\} \\ C(h) &= E[Z(x_{i+h}) * Z(x_i)] - m^2 \end{aligned} \quad (6)$$

e,

$$\begin{aligned} C(0) &= E\{[Z(x_i) - m] * [Z(x_i) - m]\} \\ C(0) &= E[Z^2(x_i)] - m^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Em que, m é a média populacional. Desenvolvendo a covariância $C(h)$, tem-se:

$$\begin{aligned} C(h) &= E\{[Z(x_{i+h}) - m(x_{i+h})] * [Z(x_i) - m(x_i)]\} = E\{[Z(x_{i+h}) - m] * [Z(x_i) - m]\} \\ C(h) &= E[Z(x_{i+h}) * Z(x_i) - m * Z(x_{i+h}) - m * Z(x_i) + m^2] \end{aligned}$$

$$C(h) = E[Z(x_{i+h}) * Z(x_i)] - 2m^2 + m^2$$

$$C(h) = E[Z(x_{i+h}) * Z(x_i)] - m^2 \quad (8)$$

Atendendo assim a hipótese em (6) e também confirmando o que está em (1). Substituindo $h = 0$ em (8) deduz-se a hipótese em (7) que significa a inclusão de todos os dados contínuos na expressão de $C(h)$. A hipótese em (7) expressa a variância populacional, com todo o conjunto de dados. Para se verificar basta desenvolver a expressão (2) que é o variograma $2\gamma(x_i, x_{i+h})$ (VIEIRA, 2002):

$$2\gamma(x_i, x_{i+h}) = 2\gamma = E\{Z^2(x_i) - 2Z(x_i) * Z(x_{i+h}) + Z^2(x_{i+h})\}$$

(somando e subtraindo $2m^2$) logo: (9)

$$2\gamma = E\{Z^2(x_i) - m^2 - 2Z(x_i) * Z(x_{i+h}) + 2m^2 + Z^2(x_{i+h}) - m^2\}$$

(linearizando o operador E e assumindo que o valor de uma constante é a própria constante) tem-se:

$$2\gamma = E\{Z^2(x_i) - m^2 - 2(E\{Z(x_i) * Z(x_{i+h})\} + m^2) + E\{Z^2(x_{i+h})\} - m^2\} \quad (10)$$

Substituindo as equações (7) e (8) na equação (10) tem-se que:

$$2\gamma(h) = C(0) - 2C(h) + C(0)$$

$$2\gamma(h) = 2C(0) - 2C(h) \text{ (simplificando)}$$

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \text{ (isolando } C(h))$$

$$C(h) = C(0) - \gamma(h) \quad (11)$$

(dividindo os dois lados por $C(0)$) têm-se:

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{C(0)} = \frac{C(0)}{C(0)} - \frac{\gamma(h)}{C(0)} \quad (12)$$

$\rho(h)$ em (12) é a equação do correlograma, logo simplificando (12) têm-se:

$$\rho(h) = 1 - \frac{C(h)}{C(0)} \quad (13)$$

Se a hipótese de estacionariedade de ordem 2 puder ser satisfeita, a covariância $C(h)$ e o variograma $2\gamma(h)$ são ferramentas equivalentes para caracterizar a dependência espacial (VIEIRA, 2002). Isto quer dizer que sob esta hipótese a função de autocorrelação (expressa

pelo correlograma) e a função de semivariância (expressa pelo variograma) são equivalentes para caracterizar a correlação (dependência espacial) de uma variável espaçada por h .

O autocorrelograma é padronizado no intervalo $[-1,1]$, sendo o alcance (distância onde ocorre independência entre valores) determinado quando a curva atinge, aproximadamente, o valor zero. A curva do semivariograma aumenta à medida que h cresce, atingindo um patamar, quando a semivariância é, aproximadamente, igual à variância da população (Clark, 1979, *apud* Prevedello, 1987), embora isto não ocorra para populações que satisfaçam apenas a hipótese intrínseca. O início deste patamar define o alcance ou raio de influência.

De maneira resumida a hipótese de estacionariedade de segunda ordem ou estacionariedade forte requer apenas:

- a) $E\{Z(x_i)\} = m$, para qualquer x_i , ou seja, uma função aleatória independente da posição x_i , $Z(x_i)$ é constante como na hipótese intrínseca.
- b) $E\{[Z(x_{i+h})-m][Z(x_i)-m]\} = C(h)$, para qualquer x_i , existe uma função covariância para cada par de valores $Z(x_{i+h})$ e $Z(x_i)$ que depende apenas do vetor h e não de sua posição.

Isto implica que os dois primeiros momentos estatísticos sejam constantes, por isso é chamada também de estacionariedade forte. Como nem sempre m é conhecida, $C(h)$ e $C(0)$ não podem ser calculados diretamente, por isso a necessidade do uso de uma hipótese menos restritiva, que é a hipótese intrínseca.

Hipótese Intrínseca: é também chamada de estacionariedade fraca e é a hipótese usualmente assumida na análise geoestatística. É expressa em termos das diferenças, ou seja, $[Z(x_{i+h})-Z(x_i)]$ das variáveis regionalizadas onde:

- a) $E\{Z(x_{i+h})-Z(x_i)\}=0$ para qualquer posição no espaço e vetor h , estabelecendo então que $Z(x_i) = \text{constante}$.
- b) $\text{Var}[Z(x_i)-Z(x_{i+h})]=E\{[Z(x_i)-Z(x_{i+h})]\}^2 = 2\gamma(h)$, ou seja, a própria função do variograma é definida como sendo a esperança do quadrado da diferença entre os valores dos pontos no espaço, separados por uma distância h .

A função variograma $2\gamma(h)$ é uma medida do comportamento espacial de uma variável regionalizada. Resolvendo o termo em (b) chega-se a função $\gamma(h)$ (equação 14) que é o semivariograma:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (14)$$

De acordo com Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que no gráfico de distribuição normal o atributo não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises. Mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, em que a média e a variabilidade dos dados sejam constantes na área em estudo, ou seja, ocorrer a estacionariedade necessária ao uso da geoestatística (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; LIMA et al., 2010).

1.4.1.3 O Semivariograma

Assumida a hipótese intrínseca, e considerando que a associação das variáveis em pontos distintos é maior à medida que mais próximos estes pontos estejam um do outro, a etapa seguinte consiste em descrever e modelar estas relações entre as distâncias e a associação espacial (ORTIZ, 2002).

Vários métodos podem ser usados para descrever essa relação, tais como a autocovariância e autocorrelação, nas quais são principalmente utilizados em medições efetuadas em uma linha reta (transecto). Porém quando as amostras forem coletadas nas duas dimensões do campo (x,y) e a interpolação entre locais medidos for necessária para a construção de mapas de isolinhas, será preciso usar uma ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial, que é o semivariograma (VIEIRA et al, 1983). O semivariograma é o gráfico gerado pela função de semivariância que representa a variabilidade espacial em função da distância numa determinada direção, e desta em relação a outras, para inferir uma possível anisotropia; exige apenas a hipótese intrínseca, comparativamente às outras medidas como a covariância, que exige estacionariedade de segunda ordem. Deste modo a semivariância pode ser utilizada em grande parte das situações.

Segundo Costa e Filho (2004) matematicamente a semivariância é definida por um par de valores $[Z(x_i), Z(x_{i+h})]$, separados pela distância h . A variância S^2 para este par de valores é:

$$S^2 = \frac{[Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2}{2} = \text{semivariância} \quad (15)$$

Se considerarmos N pares de valores separados por uma mesma distância h , a semivariância média fica:

$$\gamma(h) = \frac{E[Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2}{2}$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (16)$$

Como a função variograma é uma medida da variância das diferenças nos valores da variável regionalizada entre pontos separados por uma distância h , pontos mais próximos, por estarem correlacionados terão essa variância pequena, aumentando à medida que os pontos se distanciem (GOVAERTS, 1997; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). Na figura 3 o variograma é representado juntamente com seus componentes descritos logo a seguir. Semivariograma e variograma são termos equivalentes, sendo que o primeiro leva o prefixo *semi* devido ao denominador 2 utilizado para cancelamento dos termos da equação que o descreve.

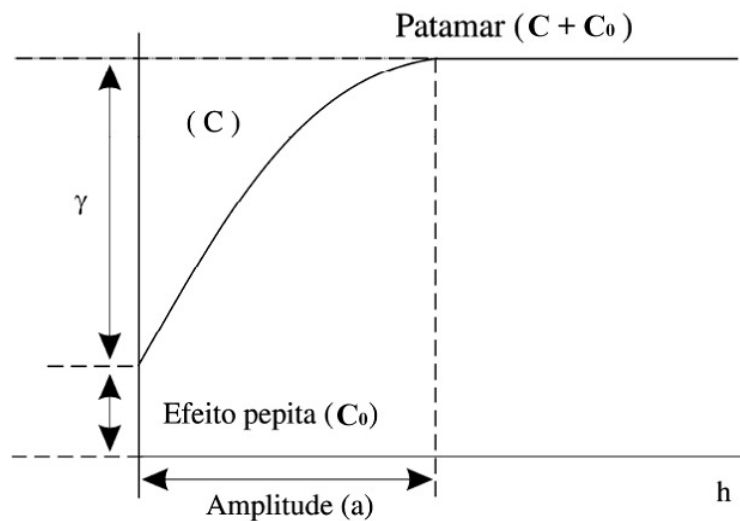


Figura 3 - Variograma teórico e seus componentes.
Fonte: Adaptado de GUERRA, 1988.

Amplitude (a): é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes. Reflete o grau de dependência entre as amostras, ou seja, quanto maior for a amplitude, maior será a homogeneidade entre as amostras, também pode ser chamado de **alcance** ou “*range*”. Nesse sentido, conforme Matheron (1963), o semivariograma dá um significado preciso da noção tradicional de zona de influência. A amplitude é a distância que separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes), ou seja,

onde a semivariância cresce em função de h até um determinado ponto onde não se observa mais a continuidade espacial (VIEIRA, 1995).

Patamar ($C+C_0$): é o valor no qual o semivariograma estabiliza-se (no campo aleatório), é o ponto a partir do qual as amostras tornam-se independentes devido à grande distância que as separam, é também chamado “*sill*”. À medida que h aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza $\gamma(h)$, é igual a, aproximadamente, a variância dos dados.

Contribuição (C): O componente estrutural também chamado de contribuição é a porção da variação que é explicada pela continuidade espacial.

Efeito Pepita (C_0): é o valor da função semivariograma na origem ($h=0$). Teoricamente esse valor deveria ser zero, pois duas amostras tomadas no mesmo ponto deveriam ter os mesmos valores, entretanto quando não é assim, atribui-se, esta diferença, geralmente, a erros de amostragem e/ou de análise. O efeito pepita reflete a variabilidade não explicada em função da distância da amostragem utilizada, como variações locais, erros de análise, erros de amostragem e outros (CAVALCANTE et al., 2007). Como é impossível quantificar a contribuição individual desses erros, o efeito pepita pode ser expresso como percentagem do patamar, facilitando, assim, a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, o efeito pepita também é chamado de variância aleatória (TRANGMAR et al., 1985).

Uma variável regionalizada pode ser representada por três tipos de semivariogramas: o experimental, o verdadeiro e o semivariograma teórico. O experimental (observado ou empírico) é obtido a partir do conjunto de dados, e é o único conhecido; o verdadeiro corresponde à situação real, que é sempre desconhecida; o teórico (figura 3) é o modelo matemático que representa a situação traduzida pelo semivariograma experimental e, portanto é o de referência para a geração dos mapas pela técnica de krigagem (MONEGO, 2007; GUERRA, 1988).

Para as medições localizadas a distâncias maiores que a amplitude (a) a estatística clássica pode ser aplicada sem restrições. Por outro lado, amostras separadas por distâncias menores que a , são correlacionadas umas às outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados. Dessa maneira, o alcance a é a linha divisória para a aplicação de geoestatística ou Estatística Clássica, e por isso o cálculo do semivariograma deveria ser feito rotineiramente para dados de campo, para garantir as hipóteses estatísticas sob as quais serão analisados (VIEIRA, 2002) (Figura 4).

Quando as propriedades do solo são similares em todas as direções, o semivariograma é idêntico para qualquer direção de h , ele é chamado de isotrópico. É importante notar que a

maioria das variáveis de ciência do solo poderá ter um comportamento anisotrópico, ou seja, o fenômeno em estudo revela diferentes padrões de dependência espacial, apresentando uma variabilidade que não é a mesma em todas as direções devido a alguma característica que condicione tal comportamento, como relevo, material de origem, escoamento superficial, etc. (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2002; GUEDES et al, 2008).

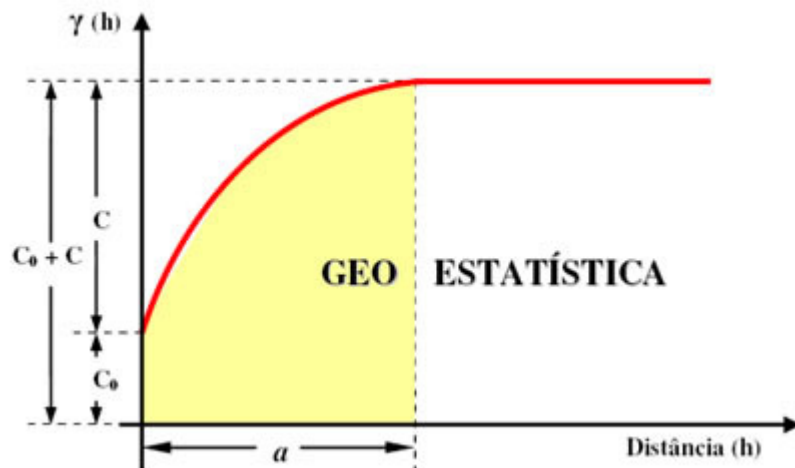


Figura 4 – Representação gráfica para aplicação da geoestatística e estatística clássica.
Fonte: Adaptado de GUERRA, 1998 e BIFFI, 2006.

Segundo Clark (1979), a anisotropia é encontrada por meio de semivariogramas, que, construídos em diferentes direções, revelam uma direção privilegiada com um padrão distinto de dependência espacial.

1.4.1.3.1 Semivariograma Para Amostra Regularmente Espaçadas

As amostras no campo são coletadas com intervalos h pré-determinados, por exemplo (100x100 metros). A análise pode seguir anisotropicamente nas direções mais usualmente utilizadas que são: 0° , 45° , 90° e 135° como ilustrado na figura 5.

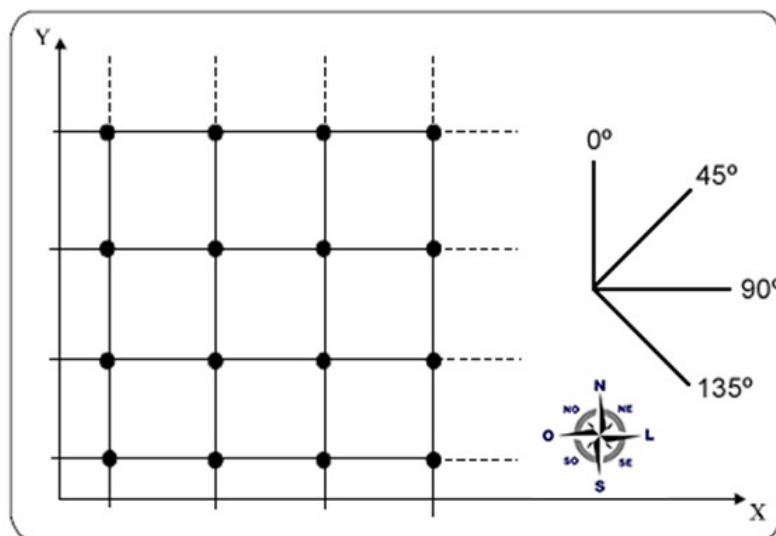


Figura 5 - Representação gráfica de uma grade de amostragem e as direções usualmente adotadas para análise anisotrópica.

Fonte: Adaptado de CAMARGO, 1996

Para determinar o semivariograma experimental, por exemplo, na direção de 90° o cálculo de $\gamma(h)$ é repetido para todos os intervalos de h . Por exemplo, para distância entre dois pontos consecutivos igual a 100 m ($d=100$ m). Então, qualquer par de observações, na direção 90°, cuja distância é igual a 100m será incluído no cálculo de $\gamma(h)$ (90°, 100 m). Isto feito, os cálculos são repetidos para a próxima distância (200 m). Isto inclui todos os pares de observações cuja distância é igual a 200m (CAMARGO, 1996). Os valores gerados pelo cálculo da semivariância $\gamma(h)$, dado pela equação (16) são plotados no gráfico do semivariograma para cada incremento de distância; esse incremento também é chamado de “lag” ou passo.

Na figura 6 é ilustrada a sequência esquemática de como é calculado a semivariância para amostras igualmente espaçadas, tendo como espaçamento 100 m entre os pontos, num total de 20 pares (N) e na direção de 90°. Cada par é contabilizado pelo conjunto de valores (exemplo: o par que representa o valor da variável 13-14, logo após 14-15, totalizando assim os 20 pares). Levando em consideração a primeira linha da figura 6, a estimação da semivariância ficaria:

$$\gamma(h) = [(13-14)^2 + (14-15)^2 + \dots + (Z(x_i) - Z(x_{i+h}))^2] / (2 \cdot 20)$$

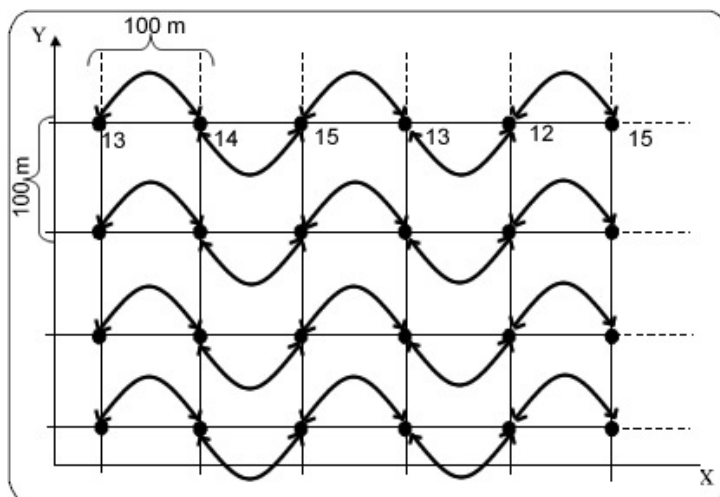


Figura 6 - Representação esquemática da sequência de cálculos para amostras igualmente espaçadas, tendo como espaçamento 100m entre os pontos (1º passo).

Fonte: Adaptado de Camargo, 1996.

Para distâncias maiores que 100 m realiza-se o mesmo procedimento, 200 m, por exemplo, (Figura 7). Neste caso o cálculo se dá com um número reduzido de pares, pois a distância é aumentada, logo a chance de se abranger um ponto no espaço diminui. No exemplo abaixo a combinação de pontos que representa o valor das variáveis 12-15, por exemplo, já foi contemplada pelo primeiro passo.

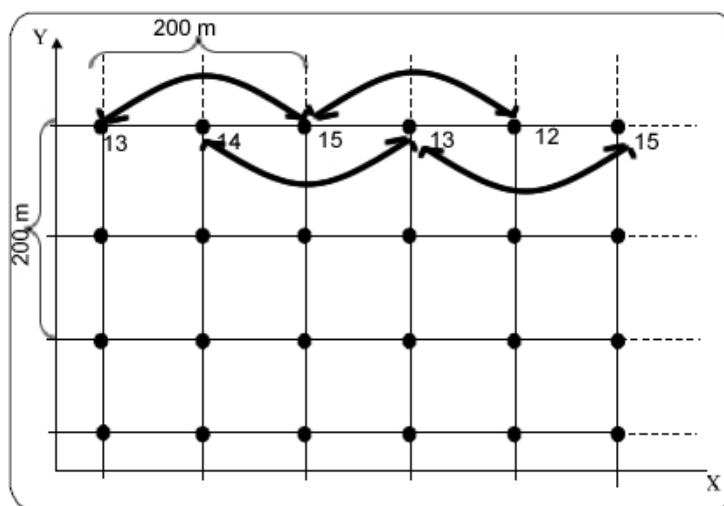


Figura 7 - Representação esquemática da sequência de cálculos para amostras igualmente espaçadas, tendo como espaçamento 100m entre os pontos.

Fonte: Adaptado de Camargo, 1996 (2º passo).

O processo é repetido até que um ponto de parada seja alcançado e deve ser calculado para as outras direções, para se verificar a presença ou não de anisotropia na área de estudo (CARMARGO, 1996).

1.4.1.3.2 Semivariograma Para Amostra Irregularmente Espaçadas

O plano de amostragem é um pouco diferente do das amostras regularmente espaçadas. Em um experimento a campos algumas vezes as amostras por algum motivo qualquer são coletadas em distâncias diferenciadas uma das outras, ou mesmo em distâncias regularmente espaçadas alguma amostra se perde, logo a abordagem para essas situações deve ser a ilustrada pela figura 8. Neste caso, para determinar o semivariograma experimental, é necessário introduzir limites de tolerância para direção e distância.

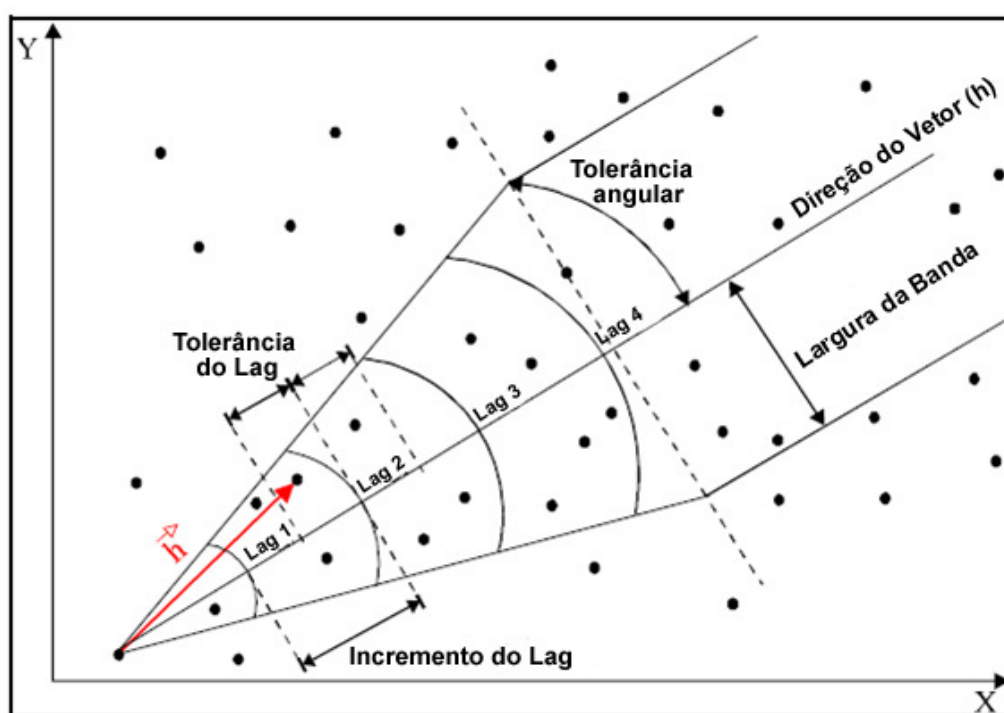


Figura 8 - Representação esquemática da sequência de cálculos para amostras irregularmente espaçadas.
Fonte: Adaptado de CAMARGO, 1996 e DEUTSCH & SCHNETZER, 2009.

Na figura acima é tomado como referência o *lag 2* e um incremento de *lag* igual a 100 metros com tolerância de 50 metros. Considerando ainda a direção de medida 45° com tolerância angular 22.5°. Então, qualquer par de observações cuja distância está compreendida entre 150m e 250m e 22.5° e 67.5° será incluído no cálculo do semivariograma de qualquer um dos lag's. Este processo se repete para todos os lag's de um ponto e em todas as direções desejadas. A direção anisotrópica continua para cada amostra (ponto) e direção pré-estabelecida em toda a superfície, como é ilustrado na figura 9a e 9b.

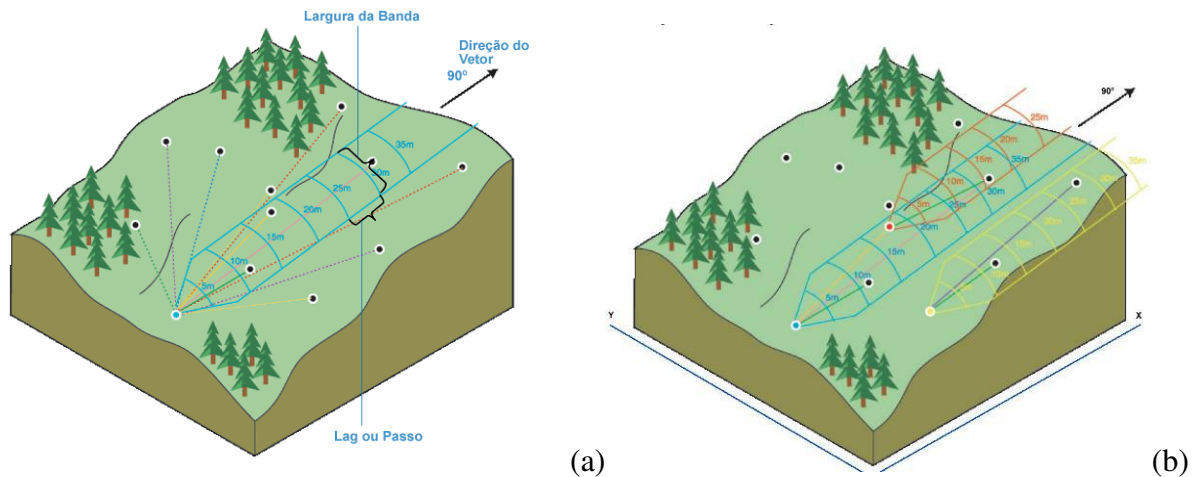


Figura 9 - Exemplo de aplicações da anisotropia
Fonte: Adaptado de ENSRI®, 2009.

Na figura 9b a distância do *lag* é de 5 em 5 metros (largura de banda), com uma direção de 90° e ângulo de tolerância de 45°. A escolha do tamanho do *lag* tem um importante efeito no semivariograma empírico, se ele for muito grande a correlação entre os dados pode ser mascarada. Por outro lado, se o *lag* for muito pequeno pode haver áreas vazias na superfície, ou seja, não contempladas no processo. Quando as amostras são alocadas em um formato de grade, ou igualmente espaçadas, o tamanho da grade geralmente é um bom indicador do tamanho do *lag*, porém se irregularmente espaçadas um método prático é multiplicar o tamanho do *lag* pela quantidade de *lag*'s e o resultado deve ser em torno da metade da maior distância entre todos os pontos (ENSRI, 2009). Isaaks & Srivastava (1989) sugerem que o *lag* para pontos irregularmente espaçados seja a média do espaçamento entre as amostras em uma vizinhança qualquer considerada.

1.4.1.3.3 Modelos de Semivariograma Teórico

Ao gráfico gerado pelo semivariograma experimental deve-se ajustar uma função que permita a sua generalização. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(h)$ em relação a h . Deste modo, as estimativas obtidas a partir da krigagem serão mais precisas e confiáveis. O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, mas interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório.

Existem alguns modelos já habitualmente usados, ou também chamados modelos básicos (GOOVAERTS, 1997), dentre eles destacam-se: o esférico, o gaussiano e o

exponencial. Estes modelos dividem-se em dois segmentos, a saber: modelos com patamar e sem patamar. As funções matemáticas dos modelos devem permitir que a matriz de covariâncias (estacionariedade de segunda ordem) ou matriz de semivariâncias (hipótese intrínseca), nele baseada, possa ser invertida, para fornecer os “pesos” para a interpolação por krigagem (LANDIN, 2003).

Modelos do primeiro tipo são referenciados na geoestatística como modelos transitivos. Alguns dos modelos transitivos atingem o patamar (C) assintoticamente. Para tais modelos, o alcance (a) ou amplitude é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar. Modelos do segundo tipo não atingem o patamar, e continuam aumentando com a distância. Tais modelos são utilizados para modelar fenômenos que possuem dispersão infinita, estes modelos denominam-se linear, potencial e logarítmico (CAMARGO, 1996; ORTIZ 2002). A figura 10 ilustra graficamente o comportamento dos modelos básicos.

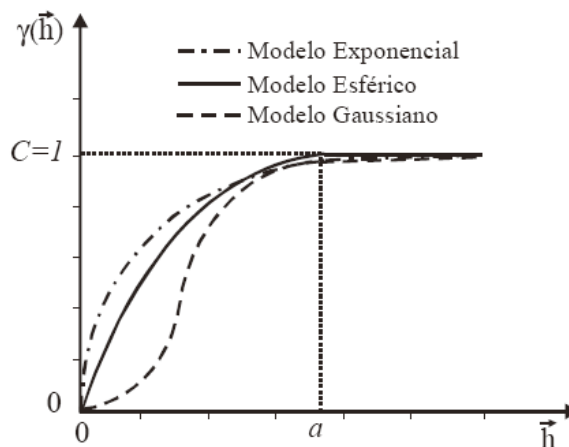


Figura 10 - Representação gráfica dos principais modelos adotados para ajuste do semivariograma.
Fonte: Adaptado de CAMARGO, 1996 & GOOVAERTS 1997.

O modelo esférico é representado pela equação (17) (VIEIRA, 2002) e é bastante utilizado na geoestatística; inicia-se na origem com um comportamento linear e vai crescendo à medida que aumenta a distância de separação entre as amostras, apresentando maior similaridade de valores mais próximos. O modelo esférico é linear até aproximadamente 1/3 de a .

Sem efeito pepita:

$$\gamma(h) = C * \left[\frac{3}{2} * \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} * \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ onde } 0 < h < a \quad (17)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a$$

Com efeito pepita:

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left[\frac{3}{2} * \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} * \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ onde } 0 < h < a \quad (18)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a$$

O modelo exponencial é representado pela equação (19) (VIEIRA, 2002); atinge o patamar assintoticamente, ou seja, alcançado para $h = \infty$. O parâmetro a é determinado visualmente, como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza ou pelo encontro da tangente na origem com o patamar C igual a variância a priori, variância finita, sendo um modelo com comportamento linear na origem (ORTIZ, 2002).

Sem efeito pepita:

$$\gamma(h) = C * \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right] \quad (19)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a$$

Com efeito pepita:

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right] \text{ onde } 0 < h < d \quad (20)$$

(d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido)

O modelo Gaussiano atinge o patamar assintoticamente, porém formando uma curva parabólica. Segundo Landin (2002) esse modelo possui um comportamento quadrático na origem e é utilizado geralmente para modelar fenômenos extremamente contínuos (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989), é representado pela equação (21).

Sem efeito pepita:

$$\gamma(h) = C * \left[1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right] \quad (21)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a$$

Com efeito pepita têm-se:

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left[1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right] \text{ onde } 0 < h < d \quad (22)$$

(d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido)

Outro modelo sem patamar é o potencial. É um modelo mais simples e sua equação é descrita em (23). Este modelo tem um crescimento monótono e o fenômeno é dito não estacionário. Seu gráfico de semivariograma pode ser visualizado na figura 11.

$$\gamma(h) = c * h^\alpha \quad (23)$$

α assumindo valores entre 0 e aproximadamente 2

c = a inclinação da reta ou coeficiente de declividade

Se: $\alpha = 1$ o modelo é considerado linear

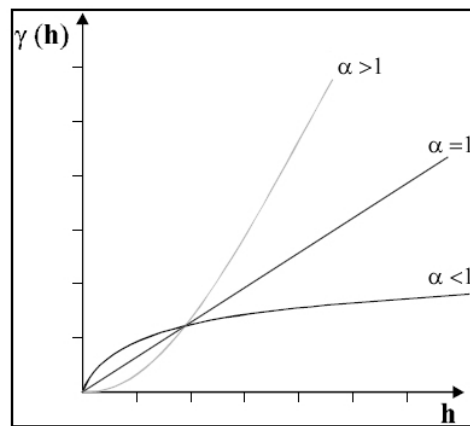


Figura 11 - Modelos do tipo potência

Fonte: Adaptado de CAMARGO, 1996 & GUERRA, 1988.

Para fenômenos completamente aleatórios ou caóticos, no qual não há correlação espacial o modelo efeito pepita puro é o adotado. Fenômenos que tem esse comportamento são considerados com dispersão infinita (VIEIRA, 2002) e sua equação é simples e é descrita em (24), seu semivariograma é apresentado na figura 12.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 \\ C \end{cases} \quad (24)$$

0 Se $h = 0$

C Se $h \neq 0$

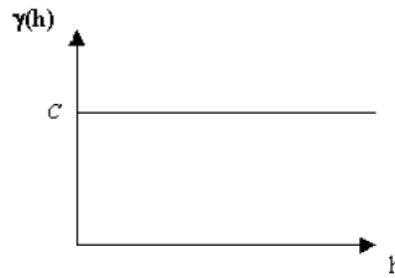


Figura 12 - Representação do modelo considerado como efeito pepita puro.
Fonte: Adaptado de CAMARGO, 1996 & GUERRA, 1988.

1.4.1.3.4 Anisotropia

A anisotropia diz respeito às diferentes direções de aplicação do semivariograma para aquelas de interesse. As convenções geralmente utilizadas são as que já foram descritas na figura 5.

Na figura 13, um exemplo de uma situação onde existem diferentes direções consideradas e um modelo ajustado para cada direção (45° e 90°), confirmando a anisotropia para essa situação, com 2 alcances “a” e “b” obtidos (detalhe na Figura 13).

Considerando o exemplo da figura 14 os semivariogramas obtidos para as direções 0°, 45°, 90° e 135°, verifica-se uma similaridade bastante grande entre eles. Esta é a representação de um caso simples e menos freqüente, em que a distribuição espacial do fenômeno é isotrópica. Neste caso, um único modelo é suficiente para descrever a variabilidade espacial do fenômeno em estudo (CAMARGO, 1996).

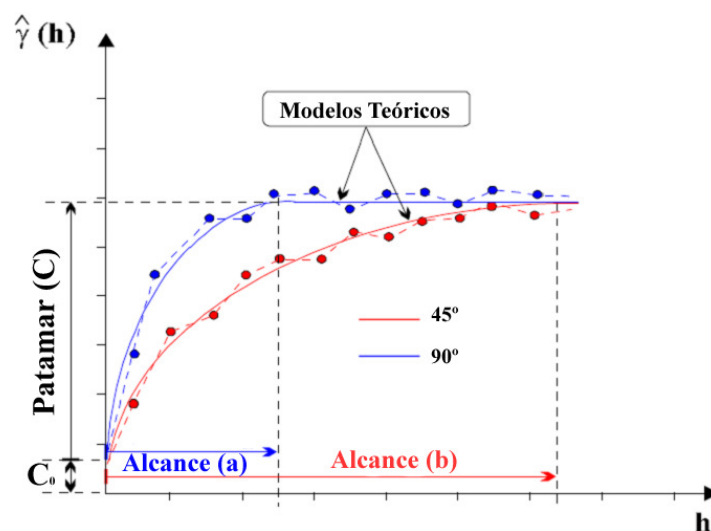


Figura 13 - Representação dos semivariogramas em diferentes direções (45° e 90°), confirmando a anisotropia.
Fonte: Adaptado de CAMARGO, 1996.

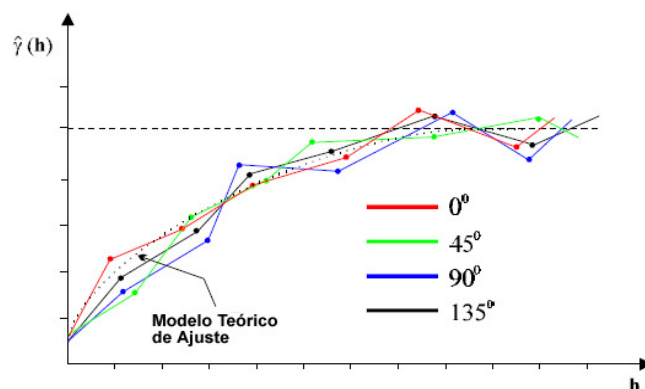


Figura 14 - Representação do semivariograma em diferentes direções e não constatada a anisotropia
Fonte: Adaptado de CAMARGO, (1996).

1.4.1.3.5 Validação do Modelo

Vários métodos são utilizados para verificar a qualidade de ajuste do semivariograma aos dados. Viera et al (1983) sugerem o método por tentativa e erro (ajuste visual, ou a critério do observador) associado à avaliação do modelo pela técnica de validação cruzada ou autovalidação (“jack-knifing”). Existem ainda outras formas de validação como o método do Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Índice de Bondade que é utilizado no software Variowin ©, porém não serão abordadas neste trabalho (PANNATIER, 1996).

O programa GS+®, utilizado para gerar e validar os semivariogramas deste trabalho, adota o método dos mínimos quadrados para ajustar os modelos e utiliza como critérios para seleção do modelo o coeficiente de determinação (R^2) e a soma de quadrados de resíduos (RSS). O primeiro é a relação entre a soma de quadrados devida ao modelo ajustado e a soma de quadrados total e, quanto mais próximo da unidade, melhor será o modelo ajustado; o segundo é dado pela soma de quadrados das diferenças entre os valores observados e aqueles estimados pelo modelo ajustado, e, quanto menor for o seu valor, melhor será o ajuste (GUIMARÃES, 2001).

1.4.1.4 Krigagem Ordinária

O processo de krigagem estima o valor de um atributo, em uma posição x_i não amostrada, a partir de um conjunto de amostras vizinhas $Z(x_i)$, $i = 1, \dots, N$. No método de krigagem os pesos dados a cada observação são determinados a partir de uma pré-análise espacial utilizando semivariogramas experimentais, e como produto dessa interpolação, gera-se um mapa (IMAI, 2003).

Há diversas formas de krigagem, porém neste estudo, tratar-se-á somente da krigagem ordinária. Esta é baseada numa média constante para dos dados, porém desconhecida, mas sob a condição de que a somatória dos pesos (λ_i) seja igual a 1. Entre os diversos métodos de interpolação

geoestatísticos, a krigagem ordinária é considerada como o melhor estimador linear não-tendencioso (*Best Linear Unbiased Estimated* - BLUE) (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

Segundo Camargo (1996) a principal diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a $1/N$; na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, por exemplo, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados.

O procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima. O modelo de krigagem ordinária é definido como:

$$Z(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad (25)$$

Em que:

$Z(x)$ é o valor da variável

μ é uma média constante

$\varepsilon(x)$ erros aleatórios com dependência espacial

O estimador da krigagem ordinária é dado pela expressão (26) segundo Vieira (2002), Trangmar (1995), e Isaacs & Srivastava, (1989)

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(x_i) \quad (26)$$

Em que:

$\hat{Z}(x_0)$ é o valor da variável de um local qualquer a ser previsto;

$Z(x_i)$ Valor da variável do local já mensurado;

λ_i são os pesos desconhecidos associados a cada valor medido;

N é o número de valores medidos;

Para que o estimador seja ótimo, ele deve ser não-tendencioso e ter variância mínima (VIEIRA, 2002). Assumindo-se a hipótese intrínseca isso pode ser matematicamente expresso por:

$$E\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\} = 0 \quad (27)$$

Em que,

x_0 é um posição qualquer.

$$VAR\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\} = E\{[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)]^2\} = \text{mínima} \quad (28)$$

Substituindo (26) em (27) tem-se:

$$E\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\} = E\left\{\sum_{i=1}^{N(h)} \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0)\right\} = \sum_{i=1}^{N(h)} \lambda_i E\{Z(x_i)\} - E\{Z(x_0)\} = 0 \quad (29)$$

Assumindo que $E\{Z(x_i)\}$ é uma constante para todo ponto x_i e aplicando a primeira condição de estacionariedade tem-se em (32) a condição que garante a não tendenciosidade do estimador.

$$E\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\} = 0 \quad (30)$$

$$m \sum_{i=1}^{N(h)} \lambda_i - m = 0 \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^{N(h)} \lambda_i = 1 \quad (32)$$

Através das hipóteses apresentadas em 1.4.1.2 e das equações (26) e (29) têm-se a seguinte expressão para a variância em (33) e utilizando o multiplicador de Lagrange para permitir a solução do sistema de equações de krigagem (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989), têm-se (34):

$$VAR\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\} = -\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + 2 \sum_i \lambda_i \gamma(x_i, x_0) \quad (33)$$

$$VAR\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\} = -\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + 2 \sum_i \lambda_i \gamma(x_i, x_0) - 2\mu \left(\sum_i \lambda_i\right) \quad (34)$$

Em que:

$2\mu(\sum_i \lambda_i)$ é o multiplicador de Lagrange

A variância quando minimizada, sujeita a restrição $\sum_{i=1}^{N(h)} \lambda_i = 1$ e igualada a zero, resulta num sistema de equações (35) de krigagem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N(h)} \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \\ \sum_{i=1}^{N(h)} \lambda_i = 1 \end{array} \right. \quad (35)$$

Resolvendo-se o sistema de equações acima obtêm-se a equação da estimativa da krigagem, já apresentada em (26).

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(x_i)$$

Segundo Ortiz (2002), através da krigagem ordinária tem-se $\hat{Z}(x_0)$, que é uma estimativa do valor esperado de $Z(x_0)$ ou $E\{Z(x_0)\}$. Por estimar uma média, o processo de krigagem implica numa suavização dos valores preditos para a região em estudo não fornecendo uma estimativa da dispersão destas variáveis, pois a variância da krigagem avalia apenas a configuração da vizinhança. Logo, repetindo-se o processo de krigagem ordinária em vários pontos da área em estudo de modo a formar uma malha fina é possível obter um mapa das estimativas na região, facilitando a interpretação quanto ao comportamento espacial da variável.

1.4.1.5 Validação Cruzada

A validação cruzada consiste em retirar-se um ponto do conjunto original de dados e estimá-lo a partir dos restantes; este processo é repetido para todos os pontos estimados. Também são estimados a variância da estimativa e outros parâmetros estatísticos que vão indicar a qualidade do ajuste global da análise geoestatística (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

A validação cruzada não avalia simplesmente o modelo de semivariograma escolhido, mas toda a modelagem do processo aleatório em questão, isto é, são colocados a prova a decisão de estacionariedade, os estimadores utilizados, o modelo de semivariograma adotado e a decisão relativa à anisotropia (ORTIZ, 2002).

1.5 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma ferramenta computacional para Geoprocessamento que permitem análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados (CÂMARA, 1998). Permitem identificar características, analisar padrões espacialmente referenciados com precisão geográfica, processar informações espaciais, criar abstrações digitais da situação real e manejar e armazenar eficientemente os dados, de forma a identificar o melhor relacionamento entre as variáveis espaciais, possibilitando a criação de relatórios e mapas que contribuam para a compreensão desses relacionamentos (MACHADO, 2002). A organização dos dados pode ser observada pela representação gráfica da figura 15.

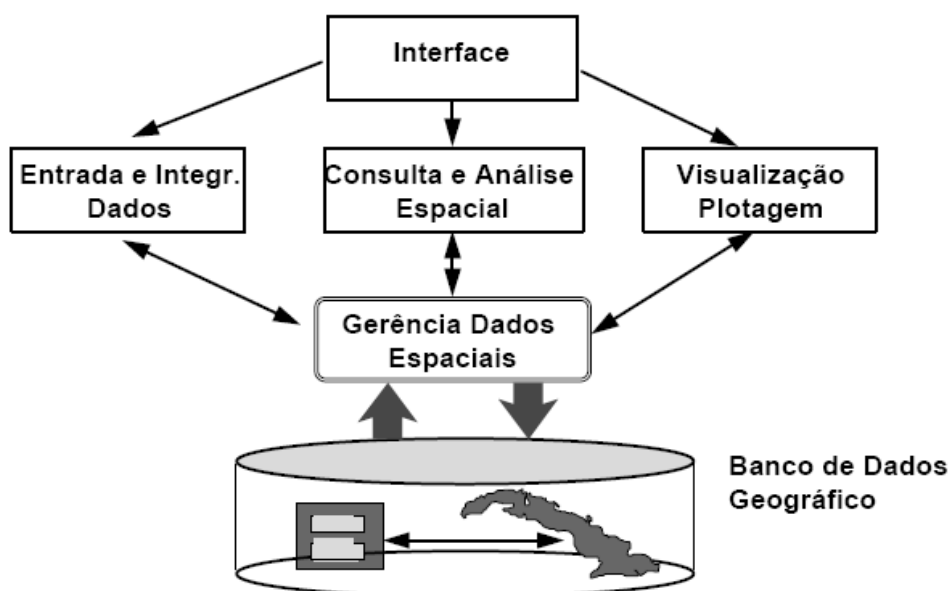


Figura 15 - Representações esquemáticas de como os dados são organizados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e suas relações.

Fonte: Câmara, 2001.

Nas análises que envolvem um grande volume de dados, é fundamental o controle e organização computacional dos mesmos. Os SIGs provêm as ferramentas essenciais para isso, onde através da espacialização das informações, as mesmas podem ser facilmente acessadas gerenciadas, podendo-se criar relatórios, gráficos, relações entre diferentes bases de dados, entre outras funções.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

As áreas de estudo situa-se no distrito de Guatá, região central do município de Lauro Muller no estado de Santa Catarina, que integra a Associação dos Municípios da Região Carbonífera – AMREC (Figura 16). Localizada na Bacia do Paraná, no topo das formações Rio Bonito e Palermo (Figura 18) onde esta localizada a Bacia Carbonífera Catarinense, que se estende por uma faixa de 20 km no sentido Leste-Oeste por 70 km no sentido Norte-Sul no estado de Santa Catarina (Figura 17) (BRASIL, 1987).

O clima na região é o Temperado Úmido (Cfa) segundo a classificação de Köppen, com precipitação e temperatura média anual de 1400 mm e 19°C, respectivamente (SANTA CATARINA, 1986).

Campos (2000) analisou um solo adjacente à área minerada e classificou-o como Alissolo Crômico Argilúvico (EMBRAPA, 1999), relatando sua correspondência ao antigamente denominado Podzólico Vermelho-Amarelo, álico, Tb, A moderado, textura média/argilosa. Com a nova classificação adotada pela EMBRAPA (2006), os solos da região são denominados de ARGISSOLOS VERMELHO AMARELO.

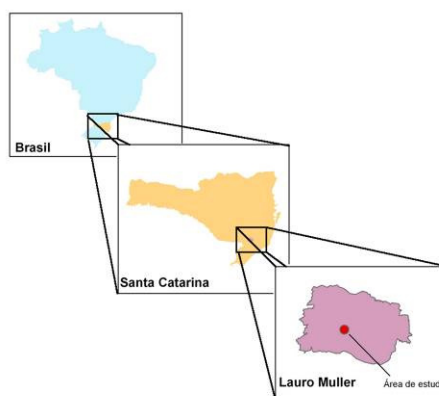


Figura 16 - Localização da área de estudo.

Como a amostragem ocorreu em áreas construídas após a mineração de carvão, não existe um perfil definido nas áreas, devido à mistura do material de várias camadas, que pelo sistema atual de classificação não se enquadraria em nenhuma classe. Sendo assim não é possível a classificação do solo diretamente nas áreas de coleta, referindo-se então a essas áreas como tipo de terreno.

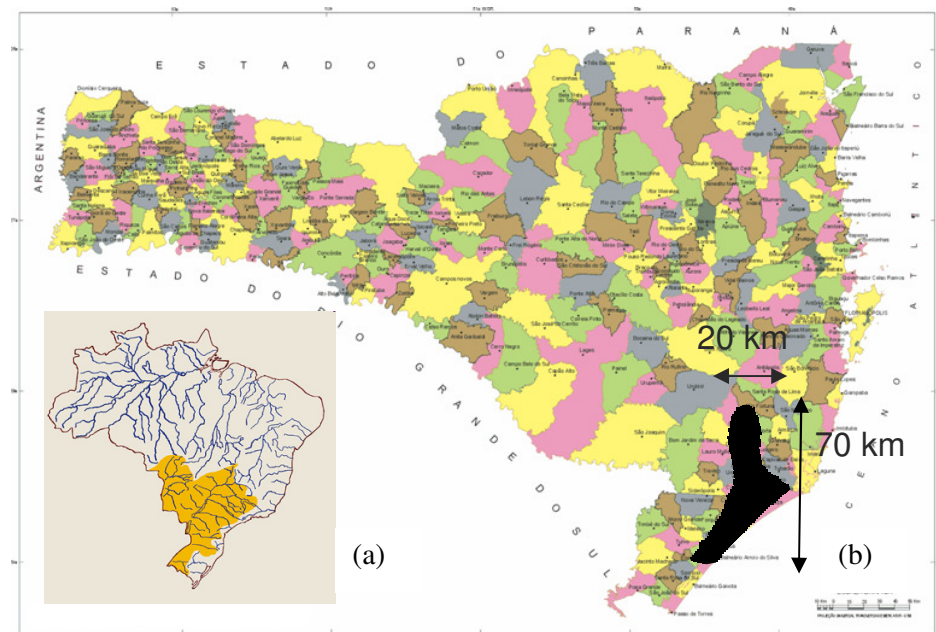


Figura 17 - Localização da Bacia do Paraná (a) e da Bacia Carbonífera Catarinense (b).
Fonte: Adaptado de SANTA CATARINA (1986); BRASIL (1987).

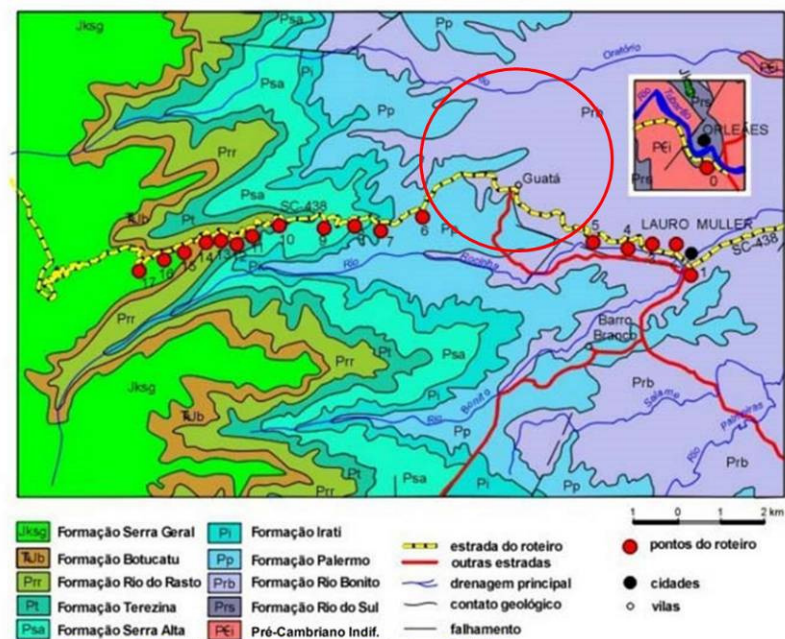


Figura 18 - Formação geológica da região de estudo (em destaque o distrito de Guatá).
Fonte: Castro, J.C.; Bortoluzzi, C.A.; Caruso Jr., F.; Krebs, A.S. (1994).

2.2 LOCAL E SISTEMA DE AMOSTRAGEM

As três áreas de coleta de solo podem ser visualizadas na figura 19, com suas respectivas delimitações, as mesmas encontram-se na mesma microbacia hidrográfica (Rio do Rasto) (EPAGRI, 2011).



Figura 19 - Localização geral das áreas de estudo.

Fonte: Adaptado de Google Earth® 4.5

As amostras de solo foram coletadas em sistema de grade de pontos equidistantes a cada 10 m (Figura 20), em duas profundidades (0 – 20 e 20 – 40 cm). Nas áreas das Minas A5 (25 pontos) e Mina A2 (24 pontos) devido à construção do terreno, à falta de solo propriamente dito e à presença de fragmentos de rochas (cascalho, matacão, etc.), em alguns pontos foram tomados em distâncias superiores, incrementadas de 10 m àquele ponto faltante. Por esse mesmo motivo, na área da Mina A2 não foram coletadas amostras em alguns pontos na segunda profundidade. Portanto nesta área, além da variabilidade dos atributos do solo, existe também uma variabilidade devido à profundidade de coleta. As coletas foram realizadas em março de 2009 (A5 e A2) e fevereiro de 2010 no Campo Nativo (25 pontos). As análises químicas e físicas foram conduzidas nos Laboratórios de Solo do CAV/UDESC e realizadas em amostras secas ao ar, destorroadas, moídas e peneiradas a seco em malha 2,0 mm para obtenção da terra fina seca ao ar – TFSA.

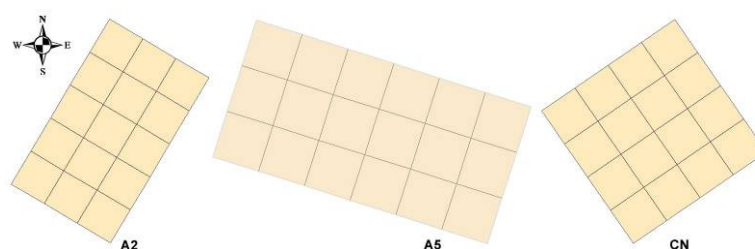


Figura 20 - Sistema de amostragem em grade de pontos equidistantes em 10 m.

2.1.1 Caracterização das Áreas em Estudo

As três áreas, uma denominada de Campo Nativo (CN-28°21'49.99"S, 49°27'23.96"W), Mina A5 (A5-28°21'59.55"S, 49°25'55.26"W) e por último Mina A2 (A2-28°21'49.99"S,

49°27'23.96"W). Essas duas últimas foram exploradas por mineração a céu aberto e posteriormente foram submetidas ao processo de recuperação.

2.1.1.1 Área de Campo Nativo (CN)

Área de CN possui aproximadamente 0,6 ha, declividade em torno de 5% na direção N-S com cobertura de gramíneas e arbustos, porém nos seus arredores há atividade de mineração (Figuras 21, 22 e 23).



Figura 21 - CN e sistema de amostragem em grade.
Fonte: adaptado de Google Earth 4.5®



Figura 22 - Delimitação do Campo Nativo.



Figura 23 - Campo Nativo com cobertura arbustiva e de gramíneas

2.1.1.2 Área 2

Área plana de aproximadamente 7,0 ha (Figura 24) que sofreu processo de construção topográfica em 1996, com preenchimento da cava minerada com mistura de rejeito piritoso, a seguir recoberta (matacão, calhau, cascalho, etc.) e solo do próprio local, e finalmente cobertura vegetal com plantação de *Eucalyptus spp.* Atualmente, com idade aproximada de 15 anos. Ressalta-se que nesta área há uma grande quantidade de fragmentos de rocha misturados com o rejeito piritoso sob a superfície (Figuras 25 e 26). Não houve qualquer processo de correção de acidez ou da fertilidade, como calagem ou adubação, procedimentos normalmente adotados em processos de recuperação de áreas degradadas.



Figura 24 - A2 e sistema de amostragem em grade.

Fonte: adaptado de Google Earth 4.5®



Figura 25 - Superfície de área A2 com fragmentos misturados com o rejeito da mineração de carvão



Figura 26 - A2 com alguns *Eucalyptus spp.*

2.1.1.3 Área 5

Área plana de aproximadamente 0,5 ha (Figura 27), com declividade de aproximadamente 3% no sentido N-S, considerada como uma área recuperada, após sofrer mineração. Houve construção topográfica no ano de 2006 utilizando sólum (horizontes A e B), regolito argiloso e rocha (compactados no fundo a cava, com objetivo de impermeabilização e isolamento do rejeito piritoso), e finalmente revegetada em 2009. Segundo o PRAD (2005) (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas) da área A5, que é utilizado em toda bacia carbonífera catarinense, houve adição de cama de aviário curtida

(quantidade não informada), calcário dolomítico ($4.000 \text{ kg. ha}^{-1}$), ambos aplicados sob a superfície e posteriormente plantio da gramínea *Brachiaria decumbens*.

Na construção topográfica desta área utilizou-se material proveniente do decapeamento de outra área, a qual não possui análise prévia deste material. Os processos responsáveis pela formação dos horizontes ainda são incipientes devido ao pouco tempo de construção da área até o presente momento (Figura 28 e 29). Pode-se notar também a presença de erosão hídrica nesta área, com sulcos onde há escoamento superficial de material.



Figura 27 - A5 e sistema de amostragem em grade.

Fonte: adaptado de Google Earth 4.5®



Figura 28 - Coleta de solo na área A5



Figura 29 - Área A5 com superfície revegetada com Braquiária

2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

2.3.1 Análise Exploratória

Os dados foram submetidos à análise exploratória, com o objetivo de se descrever as distribuições de frequências das variáveis em cada área de estudo. Foram obtidas as estatísticas: mínimo (MÍN), máximo (MÁX), média (M), mediana (ME), primeiro e terceiro quartis (Q1 e Q2), desvio padrão (DP) e coeficientes de assimetria (AS) e curtose (C).

A representação gráfica utilizada para foi o diagrama de caixas (*box plot*), elaborados no software Statística® 9.0. Foram considerados “outliers” aqueles valores externos ao intervalo $[Q1 - 1,5(Q3 - Q1); Q3 + 1,5(Q3 - Q1)]$ e “extremos” os valores externos ao intervalo $[Q1 - 3,0(Q3 - Q1); Q3 + 3,0(Q3 - Q1)]$.

2.3.2 Análise Espacial

Inicialmente gerou-se o semivariograma experimental para as variáveis estudadas, e a seguir, ajustou-se o modelo teórico que melhor representava a dependência espacial entre os pontos amostrados. O grau de dependência espacial foi classificado de acordo com Cambardella et al. (1994). Considera-se dependência espacial forte quando a razão do efeito pepita sob o patamar é menor ou igual a 25 %, dependência espacial moderada quando a razão

é superior a 25 % e menor ou igual a 75 %, e dependência fraca quando a razão é maior que 75 %.

Numa primeira etapa ajustou-se visualmente o melhor modelo sobre os pontos, levando em consideração a anisotropia. O software GS+® possibilita visualizar o semivariograma ajustado nas quatro direções já mencionadas anteriormente (0°, 45°, 90° e 135°) na mesma tela, possibilitando uma pré-visualização do modelo ajustado juntamente com os seus parâmetros.

O pH em CaCl₂ e teores de silte e areia não foram analisados geoestatisticamente, por não contribuírem para a interpretação dos dados segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC (CQFS - RS/SC) (2004). Não foi possível também analisar espacialmente os atributos de A2 em 20-40 cm, devido a insuficiência de amostras nessa profundidade ocasionadas pela falta de solo.

Foi assumida a hipótese intrínseca, por ser menos restritiva e devido ao prévio conhecimento da alta variabilidade das características do solo da região de estudo. Os mapas temáticos interpolados pela krigagem ordinária para os dados químicos e físicos foram divididos por elementos e então por área e profundidade. Para cada elemento foi gerada uma legenda própria com seus intervalos, onde nas extremidades, foi considerado o mínimo e o máximo valor da variável em estudo. Esses intervalos foram classificados geometricamente pela distribuição de frequência dos valores gerados durante o procedimento de krigagem ordinária, ou seja, em intervalos iguais no gráfico de frequências.

Os softwares utilizados para tal análise foram o GS+®, versão 9.0 para a elaboração dos semivariogramas e seleção dos modelos, e posteriormente o módulo Geostatistical Analyst® do sistema ArcGis®, versão 9.3 para confecção dos mapas e da validação cruzada. A importação dos dados, no formato DBF, foi efetuada através do módulo ArcMap® do sistema ArcGis®, ficando os dados armazenados e disponíveis para a análise espacial. A seguir foram gerados os arquivos “*shape*” para os pontos amostrados e a grade da área para posterior elaboração dos mapas temáticos.

Os gráficos de valores observados *versus* valores esperados, dos melhores modelos semivariográficos ajustados assim como os indicadores de qualidade desses modelos podem ser visualizados nos anexos.

2.4 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS

O pH em água foi determinado segundo Tedesco et al., (1995) na proporção de 1:1, ou seja, 20 ml de água destilada junto com 20 g de solo, logo após homogeneização com 30 minutos de descanso e posterior leitura em potenciômetro. O pH em sal (CaCl_2) determinado pelo método Embrapa (1997) na proporção 1:2,5, sendo 10 g de solo para 25 ml de CaCl_2 (0,01 molar – 1,47 g), logo após homogeneização com 30 minutos de descanso e leitura em potenciômetro.

Os teores de K e P foram extraídos com solução de H_2SO_4 0,0125 mol.L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹ (Mehlich-1), o K foi determinado por fotometria de chama e o P disponível por transmitância em fotocolorímetro com comprimento de onda ajustado para 660 nm (TEDESCO et al., 1995).

O alumínio trocável foi extraído com solução de KCl 1 mol.L⁻¹ e quantificado por titulometria de neutralização com indicador fenolftaleína. A base utilizada foi o (NaOH) padronizada com biftalato de potássio. Cálcio e magnésio também foram extraídos com KCl 1 mol.L⁻¹ e determinados por espectrometria de absorção atômica com atomização em chama ar-acetileno (TEDESCO et al., 1995).

A determinação da distribuição das partículas do solo por tamanho foi realizada segundo o método descrito por Day (1965) e Gee e Bauder (1986), onde se utilizou o correspondente a 30 g de TFSA, homogeneizada com 10 mL de água destilada e 70 mL hidróxido de sódio (NaOH). Após agitação a 150 rpm por 3 horas, a fração areia foi removida por tamisamento em peneira de 0,053 mm. As frações silte (0,002 a 0,053 mm) e argila (< 0,002 mm) foram separadas por sedimentação e posteriormente a argila foi medida pelo método do densímetro graduado. As frações argila e areia foram calculadas após pesagem e secagem em estufa a 105 graus Celsius e o silte foi calculado por diferença, com o auxílio da planilha de cálculo do programa Microsoft® Excel. A interpretação dos teores foi de acordo com o triângulo textural descrito por Lemos e Santos (1996).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DESCRITIVA

As estatísticas descritivas para as variáveis estudadas, nas profundidades 0-20 cm e 20-40 cm são apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente. Os valores médios foram interpretados segundo CQFS - RS/SC (2004).

Tabela 1 - Análise descritiva exploratória das variáveis nas três áreas em estudo na profundidade de 0-20 cm.

	M	D.P.	ME	MÍN	MÁX	Q1	Q3	AS	CT
-----Campo Nativo (CN)-----									
pH (água)	4,79	0,19	4,78	4,45	5,50	4,70	4,85	2,09	7,81
pH(CaCl)	4,04	0,24	4,00	3,85	5,05	3,95	4,05	3,39	13,04
K	0,19	0,06	0,18	0,13	0,45	0,16	0,21	3,42	14,55
P	0,68	0,39	0,67	0,09	1,78	0,40	0,88	0,91	1,37
Al	7,21	2,40	7,61	0,66	11,58	6,00	8,58	-0,61	1,42
Ca+Mg	0,55	0,28	0,57	0,08	1,01	0,31	0,70	0,11	-0,91
Arg.	194,15	23,16	193,95	130,62	241,95	184,61	205,14	-0,51	1,44
Silte	633,59	31,42	627,00	578,34	708,02	615,72	648,62	0,69	0,36
Areia	172,26	20,16	168,48	139,40	217,45	161,71	180,49	0,71	0,47
-----Mina (A2)-----									
pH (água)	4,02	0,28	4,05	3,45	4,45	3,83	4,23	-0,38	-0,78
pH(CaCl)	3,21	0,26	3,20	2,65	3,60	3,05	3,43	-0,16	-0,52
K	0,16	0,03	0,16	0,11	0,21	0,15	0,17	0,36	0,62
P	0,90	0,63	0,74	0,00	2,79	0,56	1,02	1,99	4,41
Al	6,74	1,84	6,30	3,99	10,53	5,59	7,71	0,85	-0,20
Ca+Mg	0,16	0,22	0,06	<0,01	0,80	<0,01	0,23	1,98	3,67
Arg.	260,62	58,76	254,87	182,48	438,35	208,50	291,13	1,11	2,13
Silte	189,31	41,07	182,18	135,64	300,31	164,61	205,12	1,15	1,29
Areia	550,07	85,07	568,69	261,33	646,93	534,90	593,24	-2,03	5,07
-----Mina (A5)-----									
pH (água)	5,10	0,70	4,83	4,10	6,60	4,70	5,43	0,98	-0,03
pH(CaCl)	4,41	0,71	4,13	3,85	6,90	4,05	4,40	2,43	6,09
K	0,28	0,11	0,23	0,16	0,51	0,21	0,34	1,22	0,15
P	10,32	19,85	2,99	0,00	87,49	0,55	11,99	3,17	10,63
Al	4,23	1,84	4,31	0,53	8,32	3,10	5,48	-0,04	0,02
Ca+Mg	6,37	3,42	6,09	<0,01	13,06	4,53	8,66	-0,24	-0,44
Arg.	442,23	84,18	453,91	258,52	605,20	421,79	484,59	-0,42	0,07
Silte	252,04	95,57	249,84	116,92	490,93	163,74	302,81	0,72	0,28
Areia	305,73	81,46	268,77	232,86	516,55	251,77	319,66	1,55	1,44

Teores de K e Al em (cmol_c.kg⁻¹), de P (mg.kg⁻¹), Ca+Mg (cmol_c.dm⁻³) Arg, Silte e Areia (g.kg⁻¹); M=média; D.P.=desvio padrão; ME=mediana; MÍN=mínimo; MÁX=máximo; Q1=1º quartil; Q3=3º quartil; AS=assimetria; CT=curtose.

Apesar dos valores dos indicadores de curtose e assimetria tenham sido altos para algumas variáveis, a proximidade entre média e mediana, aliada aos baixos valores de desvio padrão, exceção feita aos teores de P, e, ainda levando-se em consideração o número de pontos amostrados, permitem inferir que o modelo gaussiano é uma boa aproximação para a distribuição das variáveis. Há que se considerar ainda o fato de que dados geoestatísticos por

apresentarem algum grau de correlação possuem menor estabilidade em relação à forma de seu histograma, comparativamente a uma amostra independente, o que limitaria o valor daquele como um diagnóstico de falta de normalidade.

Tabela 2 - Análise descritiva exploratória das variáveis nas três áreas em estudo na profundidade de 20-40 cm.

	M	D.P.	ME	MÍN	MÁX	Q1	Q3	AS	CT
-----Campo Nativo (CN)-----									
pH (água)	4,75	0,16	4,75	4,15	5,00	4,70	4,85	-2,21	7,59
pH(CaCl)	3,94	0,20	3,95	3,40	4,35	3,90	4,05	-1,45	4,09
K	0,16	0,03	0,15	0,12	0,23	0,14	0,17	1,21	1,30
P	0,58	0,38	0,45	0,09	1,60	0,27	0,79	0,87	0,66
Al	8,18	1,67	7,62	5,43	12,64	7,23	8,53	1,09	1,00
Ca+Mg	0,49	0,33	0,46	0,02	1,15	0,22	0,74	0,41	-0,89
Arg.	203,81	17,17	203,69	171,09	244,00	197,27	212,17	0,39	0,66
Silte	616,67	48,84	622,55	407,94	666,45	610,21	641,27	-3,40	14,63
Areia	179,51	43,41	169,87	148,74	377,48	162,83	177,50	4,26	19,78
-----Mina (A2)-----									
pH (água)	4,14	0,24	4,23	3,55	4,40	4,00	4,35	-1,29	1,50
pH(CaCl)	3,31	0,26	3,33	2,80	3,60	3,15	3,55	-0,71	-0,27
K	0,16	0,04	0,17	0,09	0,21	0,15	0,18	-1,07	0,94
P	1,00	0,82	0,79	0,28	3,72	0,65	1,02	3,23	11,39
Al	7,13	2,27	6,78	4,01	12,91	5,84	8,63	1,20	2,20
Ca+Mg	0,14	0,19	0,08	<0,01	0,76	0,05	0,13	3,03	9,99
Arg.	266,05	62,20	274,35	193,68	428,04	213,95	284,38	1,29	2,54
Silte	183,04	46,48	167,83	136,09	299,73	154,48	192,30	1,50	1,91
Areia	550,92	92,12	566,23	272,23	640,30	537,03	605,21	-2,32	6,71
-----Mina (A5)-----									
pH (água)	4,67	0,68	4,60	3,55	6,45	4,25	4,80	1,23	1,92
pH(CaCl)	4,01	0,61	3,90	3,25	6,10	3,75	4,05	2,23	5,83
K	0,24	0,04	0,23	0,17	0,31	0,21	0,26	0,38	-0,47
P	4,26	9,26	0,64	0,09	40,54	0,28	2,95	3,14	10,14
Al	6,33	3,19	6,71	0,08	14,07	4,21	8,62	0,02	0,35
Ca+Mg	5,59	3,86	5,34	0,11	13,48	2,84	8,03	0,39	-0,63
Arg.	394,09	95,80	397,21	164,68	534,97	340,29	454,87	-0,56	-0,05
Silte	337,82	131,74	329,77	142,28	749,44	242,04	378,97	1,39	3,03
Areia	268,09	96,61	264,31	80,05	517,42	242,62	303,34	0,25	1,21

Teores de K e Al em (cmol_c.kg⁻¹), de P (mg.kg⁻¹), Ca+Mg (cmol_c.dm⁻³), Arg, Silte e Areia (g.kg⁻¹); M=média; D.P.=desvio padrão; ME=mediana; MÍN=mínimo; MÁX=máximo; Q1=1º quartil; Q3=3º quartil; AS=assimetria; CT=curtose.

Os valores de pH em CaCl₂ foram menores que os de pH em água, indicando que, nos solos da região, há o predomínio de cargas líquidas negativas nas partículas. Costa e Zocche, (2009), estudando a fertilidade de solos construídos em áreas de mineração de carvão em Santa Catarina no município de Siderópolis, concluíram que essa condição aliada à baixa concentração de Ca+Mg e alta concentração de Al⁺³ que revelam que a maior porcentagem de cargas negativas deve estar ocupada por H⁺ e Al⁺³, que são potencialmente tóxicos.

Em todas as áreas a média de pH é considerada de baixa (5,1-5,4) a muito baixa (≤5,0). A variação do pH na Mina A5, (figura 30) ocorreu em razão do processo de adubação

e calagem somente na superfície, somado a distribuição deste de forma irregular sobre a área. Os valores baixos de pH em água para CN e Mina A2 devem-se ao fato do CN ser naturalmente ácido, pelo seu material de origem ser pobre em bases. Na Mina A2 foi encontrada a menor média (4,02 e 4,14) para as duas profundidades (0-20, 20-40 cm respectivamente), devido provavelmente à oxidação da pirita (FeS_2) que acidifica o meio. Esse processo pode inibir o crescimento de espécies vegetais e afeta a disponibilidade de nutrientes. Valores muito baixos de pH também foram observados por Ribeiro et al. (2008) para a mesma área, e foram atribuídos ao intenso processo de oxidação da pirita. Além disso, baixos valores de pH ($<5,5$) diminuem a decomposição da matéria orgânica, aumentando o alumínio trocável e também a solubilidade dos compostos de ferro e alumínio (ERNANI, 2008).

Os teores médios de Al ultrapassaram $4,0 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ (considerado tóxico às plantas) concordando com a classificação de Alissolo Crômico Argilúvico, determinado por Campos (2000), hoje correspondente ao Argissolo Vermelho Amarelo alítico.

Os teores médios de Al para o CN $7,21 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ (0-20 cm), $8,18 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ (20-40 cm) foram maiores que a média para as duas outras áreas A2 e A5 nas duas profundidades, devido provavelmente ao material de origem altamente intemperizado e pobre em bases. A explicação para essa diferença segundo Campos et al. (2003) pode ser que nessas áreas construídas, devido à presença de material oriundo de camadas mais profundas, em mistura com solo estocado proveniente de outro local, possam apresentar níveis menos acentuados de acidez. Conforme já mencionado, não se sabe ao certo a origem do material utilizado para a construção da área A5. Quiñones (2004) destaca que no solo natural, onde os empreendimentos de mineração os circundam, a possível causa para uma maior concentração de Al, seria a utilização prévia da área como depósito temporário de materiais estéreis e que a exposição da pirita a condições oxidantes pode ocasionar a contaminação do solo através da infiltração dos lixiviados produzidos pela oxidação desse sulfeto, como ocorre em A2.

Inda et al. (2010) evidencia que os teores elevados de Al^{+3} em áreas construídas após a mineração de carvão, liberados pela dissolução ácida dos silicatos, aliados à baixa mobilidade do Al^{+3} , favorecem a sua concentração relativa em razão da lixiviação preferencial dos cátions básicos. Na área A5 os valores médios de Al^{+3} apresentaram-se menores relativamente às outras áreas. Esse fato pode ser explicado pela maneira como a área sofreu a construção topográfica, destacando-se o processo de compactação da cava que restringe a ação da água e do oxigênio, promovendo o aumento da taxa das reações produtoras de alcalinidade, ao mesmo tempo em que retardada a cinética das reações produtoras de acidez (SOARES et al.,

2002; KAMPF et al., 1997; QUINONES et al., 2008). A área A5 sofreu correção de acidez com calcário em superfície, o que também contribui para os menores valores de Al trocável (Al^{+3}), entretanto pode-se notar um efeito em profundidade devido a essa calagem, onde para de 0-20 cm a concentração de Al^{+3} foi menor que de 20-40 cm com uma diferença em média de $2,1 \text{ cmol.kg}^{-1}$. Como já mencionado anteriormente, na construção topográfica desta área utilizou-se solo de uma área de empréstimo sobre o qual não houve uma análise prévia, logo não há garantia de que os atributos químicos e físicos desta área estejam somente sob influência do solo do local construído.

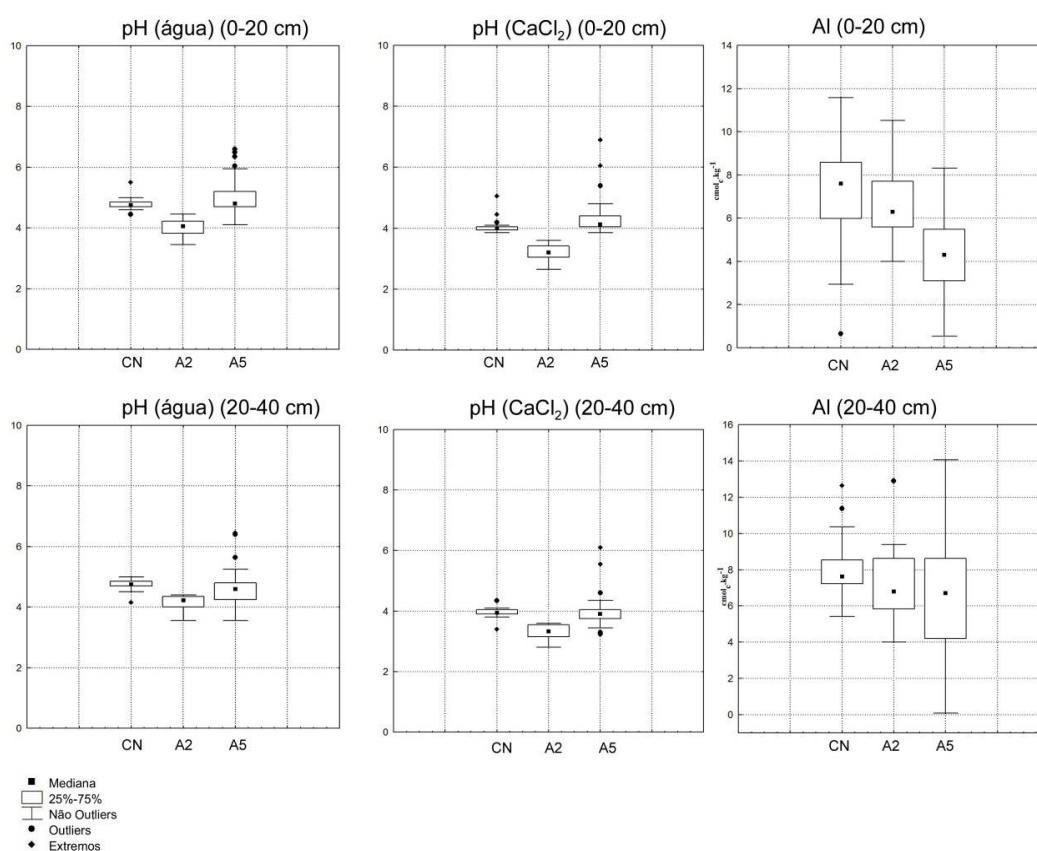


Figura 30 - Representação da distribuição e da variabilidade das variáveis pH(água), pH(CaCl₂) e Al.

Os teores médios de K foram considerados altos para CN, A2 e A5 (CQFS - RS/SC, 2004) levando em consideração a $CTC_{pH\ 7,0}$ no intervalo entre 5,1 a 15,0 dos estudos de Campos et al. (2003) e Lunardi Neto (2006) em áreas onde houve construção topográfica na mesma região deste estudo. Em A2 especialmente em se tratando de solo construído, onde há provavelmente oxidação da pirita de forma mais intensa e não houve correção da acidez, constatou-se a menor média ($0,16 \text{ cmol.kg}^{-1}$) de K nas duas profundidades.

Segundo Lunardi Neto (2006) que realizou estudos referentes a qualidade química de solos construídos no distrito de Guatá, um efeito a ser considerado é o deslocamento do K da

fase sólida para a solução através da ação de massas, principalmente através da adição de Ca e Mg (oriundos da cama de aviário), o que pode favorecer a perda de K por lixiviação. No entanto, este efeito pode não ter ocorrido ou ocorreu com baixa intensidade, já que os teores médios de K no solo foram maiores na Mina A5, onde houve adição de cama de aviário e calcário. No CN os teores médios de K são menores comparativamente aos de A5 devido ao material de origem dessa área, oriundo da formação geológica Palermo e Rio Bonito que são constituídos basicamente por arenito, siltito e argilito, que são pobres nesse elemento.

Os teores médios de Ca+Mg (figura 31) foram considerados baixos para CN e A2 em ambas as profundidades, concordando com os dados obtidos por Ribeiro et al., (2008), Costa e Zocche, (2009) e Lunardi Neto (2008) trabalhando em áreas de solo construído na mesma região. Os elementos cálcio, magnésio em solos tropicais e subtropicais, que são, na sua maioria, ácidos, normalmente se encontram em concentrações baixas, isso é natural, pois as perdas de bases são características do processo de acidificação dos solos (LUCHESE et al., 2002).

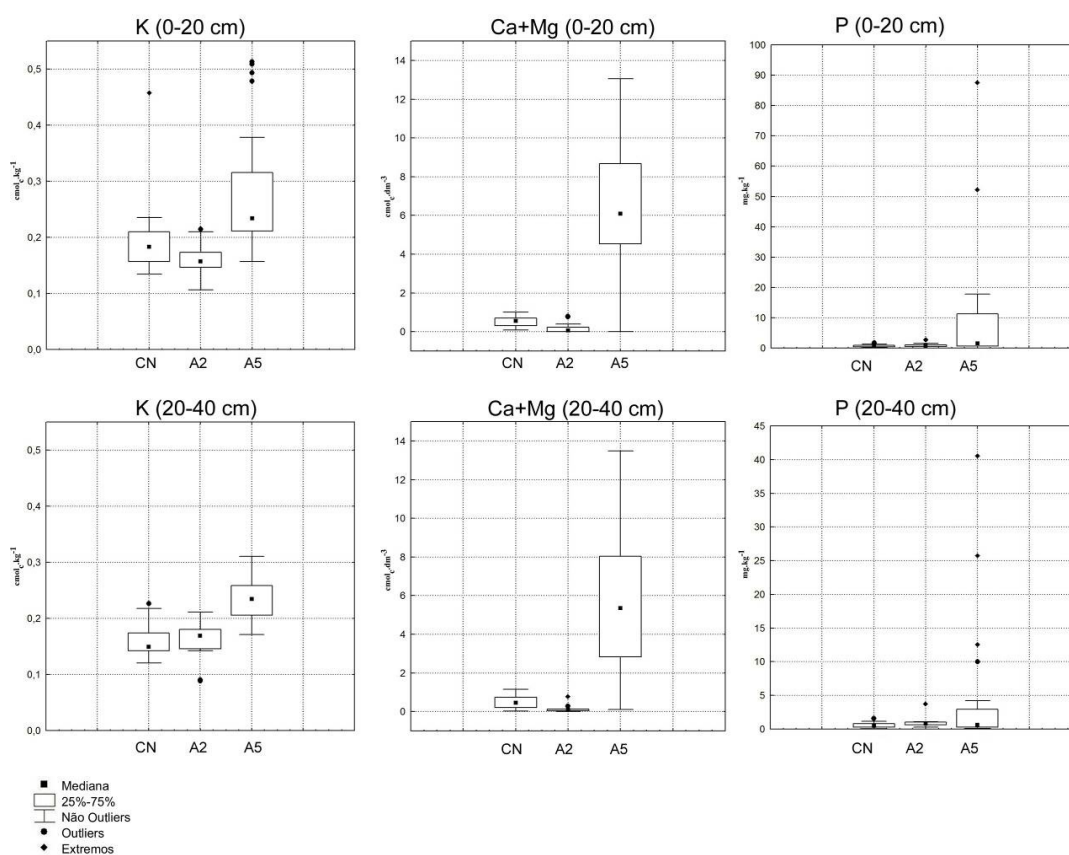


Figura 31 - Representação da distribuição e da variabilidade das variáveis K, Ca+Mg e P.

A deficiência de cátions básicos como Ca e Mg em solos construídos após mineração de carvão reflete a intensa intemperização dos minerais e as consequentes perdas desses

elementos por lixiviação (PITCHEL et al., 1994). Na área A2 os baixos valores de Ca+Mg se devem ao maior tempo de exposição das camadas do solo às condições oxidantes, que segundo Campos et al. (2003) favorece a dissolução de silicatos e a lixiviação de cátions como Ca e Mg. Em A5 os teores médios de Ca+Mg foram altos, variando de $<0,01$ a $11,48 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, praticamente sem alteração com a profundidade. Estes valores podem ser explicados pela adubação e calagem realizada no local, pela ciclagem de nutrientes, visto que a área é coberta por gramíneas e também pelo pouco tempo de construção topográfica da área, cerca de cinco anos, o que pode ter amenizado o processo de lixiviação de bases.

Os teores médios de P foram considerados muito baixos, para CN e A2 nas duas profundidades, com menor dispersão de valores (figura 31) em relação A5. Resultados semelhantes foram encontrados por Quiñones (2004) estudando um campo nativo e duas áreas construídas após mineração de carvão no município de Minas do Leão, RS. No caso de A5, observou-se uma concentração média alta de P na camada 0-20 cm, no entanto, a presença de “outliers” e extremos demonstra o efeito da desuniformidade na aplicação do corretivo. Na profundidade de 20-40 cm o teor de P é baixo, devido principalmente à aplicação do adubo orgânico somente sob a superfície com uma má distribuição.

Como o P é um elemento pouco móvel, se não aplicado e manejado corretamente, tende a ficar em superfície e não atingindo assim as camadas mais profundas (ERNANI et al., 2001). A baixa concentração de P em A2 pode ser explicada em parte, pelo material de origem do solo que é derivado de misturas de diferentes horizontes e suas camadas subjacentes, originadas de rochas sedimentares, principalmente arenito que é pobre em P.

Lunardi Neto et al., (2008) encontraram valores muito baixos de P e uma alta variabilidade do mesmo para a mesma região. Como os solos construídos são essencialmente antropogênicos e seus processos pedogênicos muitas vezes são ainda incipientes, (CAMPOS et al., 2003) os teores de fósforo nas áreas estudadas podem ser baixos devido à sua remoção (COSTA E ZOCHE, 2009). Daniels, (1996) citado por Campos et al. (2010) enfatiza que os solos de mina intemperizam e oxidam resultando em maiores concentrações de óxidos de Fe, os quais adsorvem especificamente P da solução, tornando-o assim indisponível para as plantas. Ainda segundo este autor a disponibilidade de P nas áreas construídas diminui devido aos materiais geológicos serem, geralmente, pobres em P-disponível. Outra questão é a quase ausência da decomposição da matéria orgânica e mineralização do P, devido ao baixo pH e a ausência de entrada de material orgânico.

Os solos das áreas estudadas foram classificados, de acordo com a textura, em franco siltosa (CN), franco argilo arenosa (A2) e argilosa (A5).

A área A2 foi a que apresentou as maiores médias da fração areia (figura 32), com valores em torno de 550 g.kg^{-1} , enquanto que nas áreas A5 e CN o teor médio de areia é de, 280 g.kg^{-1} e 176 g.kg^{-1} , respectivamente. Diferentemente dos dados de Quinões et al. (2008), Gonçalves (2008) e Nunes (2002) que encontraram altos valores de argila para as áreas construídas e atribuíram este fato a constituição do material de origem, composto em grande parte por rochas siltico-argilosas.

Campos et al. (2003) concluíram que o baixo teor de argila resultou da forma inadequada de construção da área, na qual, grande parte do sólido e do regolito deve ter sido perdida, e a construção topográfica realizou-se com a utilização dos fragmentos do arenito Barro Branco em mistura com camadas siltosas e resíduos do carvão.

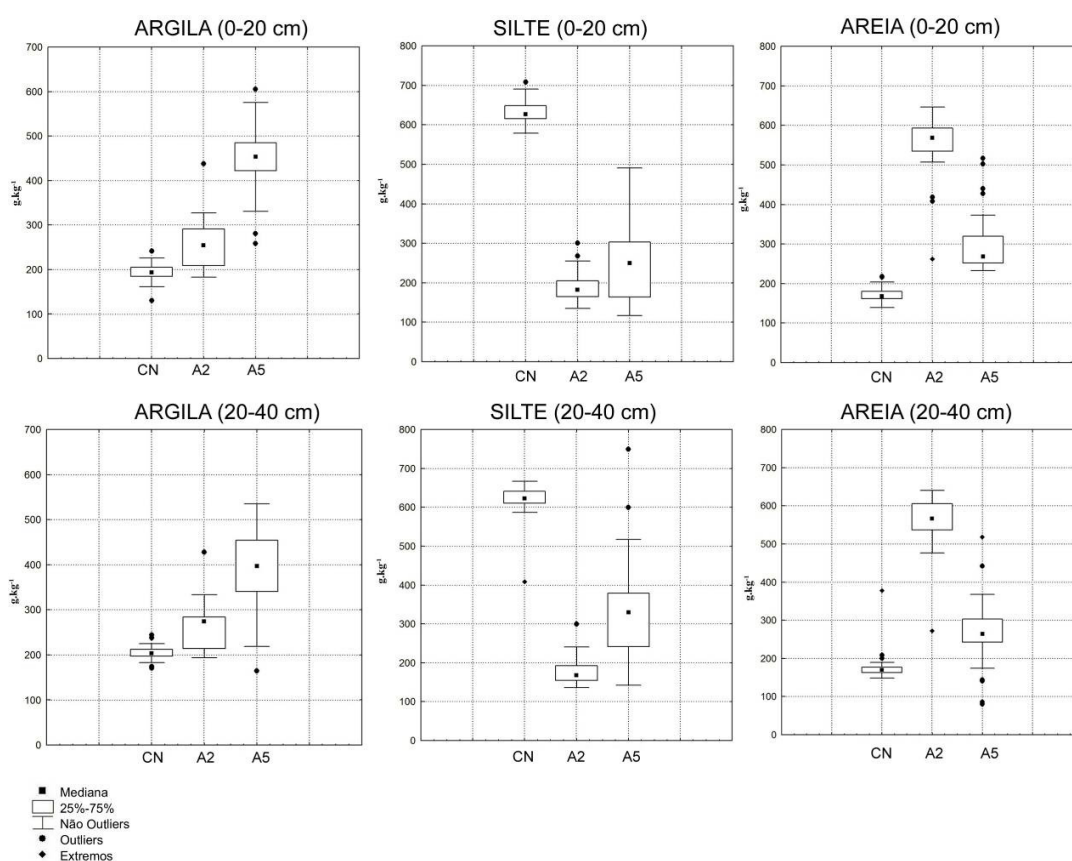


Figura 32 - Representação da distribuição e da variabilidade das variáveis físicas nas duas profundidades.

Durante a mineração em A2, não houve a preocupação em separar corretamente as camadas do solo para posterior construção, como orienta o DNPM, resultando dessa forma em um revolvimento e mistura de suas camadas.

A provável compactação e falta de estruturação do solo em A2 pode ser o principal entrave no estabelecimento e desenvolvimento dos vegetais superiores que foram inseridos

nesta área com o objetivo de recuperação. Pichtel et al., (1994) enfatizam que as limitações físicas resultantes dos processos de construção de áreas mineradas com carvão a céu aberto podem incluir estrutura fraca, baixa permeabilidade da camada superficial à água devido ao encrostamento superficial e baixa capacidade de retenção de água.

A fração silte apresentou maiores teores em CN, com valores médios acima de 600 g.kg⁻¹, característica de solos siltosos derivado de siltitos, com alguma contribuição de arenitos, presentes na formação que lhes deu origem, o que explicaria este comportamento. Porém em A5 os teores médios de areia, silte e argila não são tão discrepantes quanto ao CN e A2, tendo uma contribuição mais equilibrada do material de origem, aliada aos processos de construção topográfica, adubação, calagem e revegetação, neste caso com braquiária.

Franco (2006) e Kampf et al. (1997) estudando áreas construídas após mineração de carvão enfatizam que os solos construídos refletem as características dos materiais utilizados na construção, sendo necessário que se faça uma seleção criteriosa destes materiais e do método de construção para se obter solos com melhor qualidade e potencial de uso para atividades futuras, principalmente para o desenvolvimento das plantas.

3.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

3.2.1 Análise Semivariográfica

Os dados referentes aos parâmetros geoestatísticos dos semivariogramas ajustados para cada variável química pode ser observado na tabela 3. Também está representada a classificação do modelo de ajuste segundo Cambardella et al. (1994) além dos indicadores de qualidade de ajuste dos modelos, o coeficiente de determinação (R^2) e a soma de quadrado dos resíduos (SQR). Os resultados da validação cruzada encontram-se no apêndice, juntamente com as estatísticas dos erros dos modelos ajustados.

3.2.1.1 Propriedades Químicas

Para o pH em água (figura 33) somente encontrou-se semivariograma na área A5, nas duas profundidades, com modelo do tipo gaussiano. Na profundidade 0-20 cm foi observada anisotropia na direção de 45°. Existe, portanto, uma dependência espacial direcionada, com dois alcances, formando uma elipse, na qual o eixo maior é igual a 187,9 m e o eixo menor 76,7 m em direção a 45°, tendo o Norte como referência de eixo Y no plano cartesiano.

Tabela 3 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados para as três áreas de estudo, nas profundidades 0-20 cm e 20-40 cm.

Área	Modelo	Alcance (m)	Patamar	Pepita	Grau Dependência (%)	Classe	R ²	SQR
pH (água)								
-----0-20 cm-----								
CN	Gaussiano	83,8	0,2362	0,0131	5,54	Forte	0,934	2,022
A2	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,471	1,53
A5	Gaussiano	[187,9-76,7]	3,63	0,168	4,62	Forte	0,629	1,24
-----20-40 cm-----								
CN	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,633	3,83
A5	Esférico	52,9	0,564	0,229	40	Moderado	0,763	0,0118
K								
-----0-20 cm-----								
CN	Gaussiano	116,7	0,0609	0,0005	0,82	Forte	0,929	4,88
A2	Esférico	46,6	0,0007	0,0002	28,57	Moderado	0,335	1,295
A5	Gaussiano	64,9	0,0162	0,0062	38,27	Moderado	0,909	6,664
-----20-40 cm-----								
CN	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,656	1,414
A5	Gaussiano	[147,1-91,28]	0,0049	0,0005	10,2	Forte	0,683	1,54
P								
-----0-20 cm-----								
CN	Esférico	33,3	0,1984	0,0252	12,7	Forte	0,526	4,55
A2	Aleatório	..	..	..	..	E.P.P	0,612	1,12
A5	Gaussiano	65,6	1146,9	168	14,65	Forte	0,833	50767
-----20-40 cm-----								
CN	Esférico	33,6	0,1556	0,0243	15,62	Forte	0,441	3,872
A5	Gaussiano	60,2	265,5	32,3	12,17	Forte	0,942	1088
Al								
-----0-20 cm-----								
CN	Gaussiano	59,2	20,11	2,28	11,34	Forte	0,953	2,41
A2	Gaussiano	[58,11-35,12]	9,195	1,17	12,72	Forte	0,510	62,5
A5	Gaussiano	[78,83-40,79]	8,941	1,423	15,92	Forte	0,227	50,8
-----20-40 cm-----								
CN	Gaussiano	52,7	7,769	1,13	14,54	Forte	0,932	0,713
A5	Gaussiano	[122,96-73,3]	51,985	7,19	13,83	Forte	0,574	306,00
Ca+Mg								
-----0-20 cm-----								
CN	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,746	1,30E-03
A2	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,845	1,67E-03
A5	Gaussiano	93,2	37,11	8,56	23,07	Forte	0,593	52,1
-----20-40 cm-----								
CN	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,000	5,07E-03
A5	Gaussiano	41,35	18,186	9,402	51,70	Moderado	0,013	141,00

Trangmar et al. (1985) destacam que a anisotropia pode ser detectada devido à quantidade de pares envolvidos no cálculo do semivariograma, podendo dessa maneira computar valores diferentes (atípicos) daqueles encontrados na análise isotrópica. Para A5, esses valores contribuem para a caracterização de uma dependência espacial (5,54%) na

direção de 45°, classificada como forte. Não houve anisotropia detectada na profundidade de 20-40 cm e o modelo ajustado foi o Esférico, com um alcance de 52,9 m e 40% de dependência (moderada). A diferença no comportamento espacial do pH em profundidade deve-se, provavelmente, aos tratamentos corretivos não incorporados ao solo que A5 sofreu durante sua construção, e até a leve declividade do terreno (3%) na direção N-S. Em CN houve semivariograma ajustado, do tipo gaussiano, na profundidade 0-20 cm, com alcance superior a 80 m, dependência forte e R^2 igual a 0,934. Resultado semelhante foi encontrado por Cambardella et al. (1994), Cavalcante et al. (2007) e Nunes (2002) para áreas naturais.

Nas outras áreas, não houve semivariograma ajustado ou E.P.P. para a variável pH, portanto, as amostras são independentes. Este comportamento pode ser atribuído à perturbação desordenada que o sistema de mineração a céu aberto proporciona (CAMPOS et al., 2003) ou à presença de variabilidade em uma distância inferior àquela da amostragem (10 m). Maçaneiro (2001) também não encontrou semivariograma para pH e outros atributos do solo em áreas construídas, com distâncias entre amostras de menos de 1,0 m.

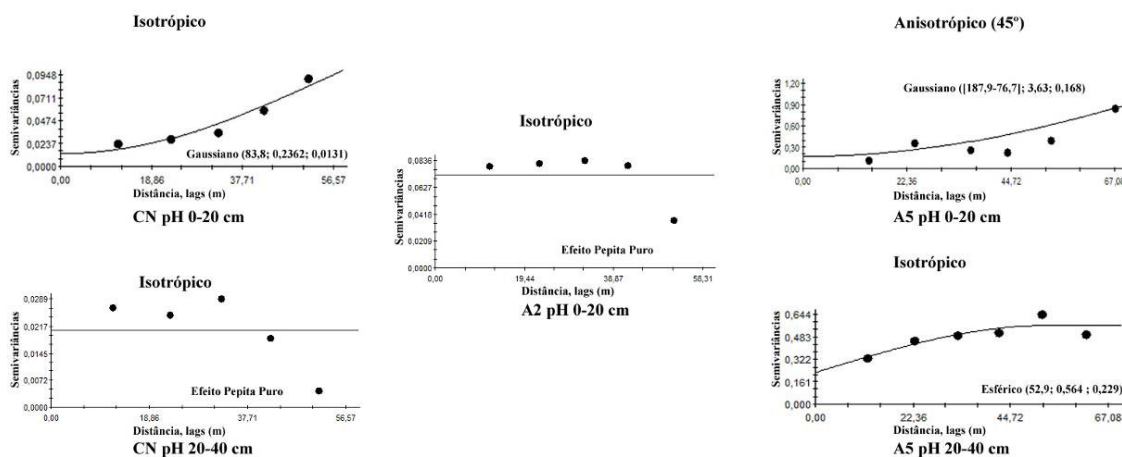


Figura 33 - Semivariogramas ajustados para pH nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.

Para K (figura 34) houve modelo ajustado em praticamente todas as áreas e profundidades, exceto para o CN na segunda para a profundidade de 20-40 cm. Na área A5 foi constatada a anisotropia na direção de 90°, que no campo corresponde a direção O-E, com um alcance de eixo maior igual 147,1 m e eixo menor igual 91,28 m. No CN não houve ajuste na segunda profundidade, o que pode ser atribuído à lixiviação (neste caso irregular espacialmente) do potássio no solo devido à ação das chuvas e à a textura mais grosseira (WERLE, et al., 2008).

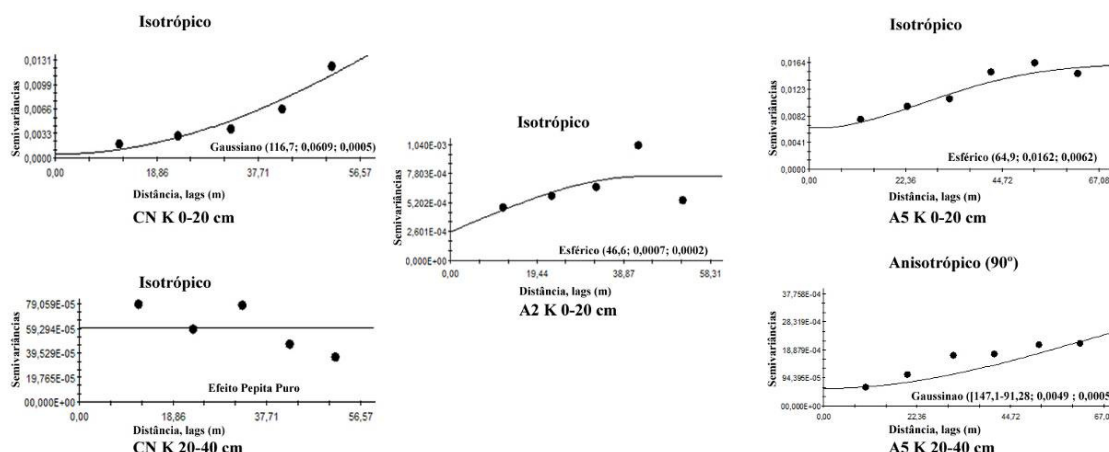


Figura 34 - Semivariogramas ajustados para **K** nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.

Em relação a P (figura 35) houve semivariograma ajustado na maioria das áreas e profundidades, com maior alcance isotrópico em A5, em torno de 60 m. Pode-se observar também em A5 e CN uma semelhança no comportamento semivariográfico nas duas profundidades, porém a soma de quadrado dos resíduos (SQR) na profundidade 0-20 cm em A5 foi maior que na de 20-40 cm, o que provavelmente é devido a uma maior variabilidade na primeira profundidade, o que também pode ser observado nos diagramas de *box plot* (figura 31). Não foi detectada anisotropia. Salientam-se os baixos teores médios deste elemento e a sua alta variabilidade em áreas construídas.

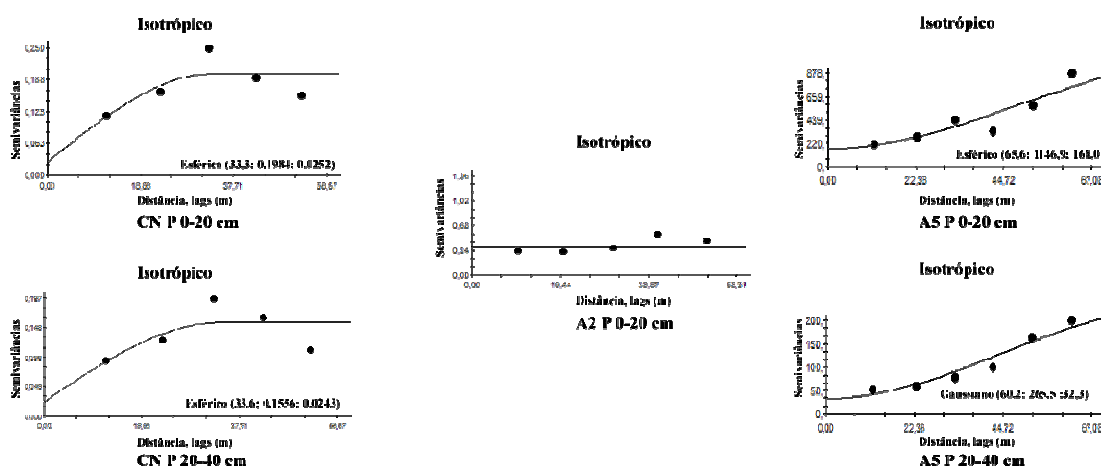


Figura 35 - Semivariogramas ajustados para **P** nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.

Para o Al houve ajuste (figura 36), em todas as áreas e profundidades, de modelos gaussianos com índice de dependência forte. Para as áreas A2 e A5 detectou-se anisotropia. Na primeira, na direção 135° (SO-NE), com eixo maior de dependência de 58,11 m e eixo

menor 35,12 m, enquanto que na segunda, na direção de 135° (profundidade de 20-40 cm) e 45° (profundidade de 0-20 cm). Tal comportamento também ocorreu para o pH em água demonstrando a relação direcional existente entre essas duas variáveis. Campos et al. (2003) encontraram semivariograma para Al com dependência espacial forte em áreas construídas.

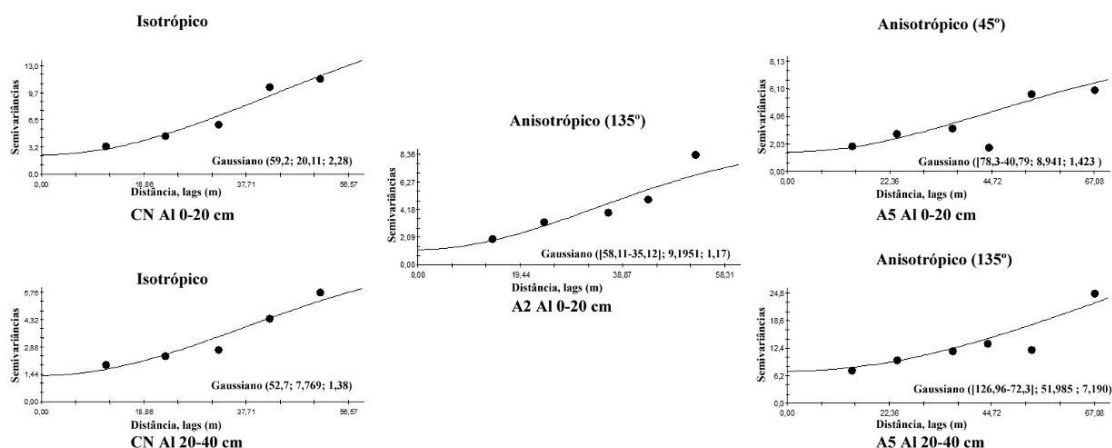


Figura 36 - Semivariogramas ajustados para **Al** nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.

O Ca+Mg (figura 37) foi o que menos se correlacionou espacialmente, tendo somente A5 com semivariogramas ajustados, com alcance de 93 m, na profundidade de 0-20 cm e dependência forte. Na profundidade de 20-40 cm o alcance foi de 41,3 m e dependência moderada. Esta área é a que sofreu processos de correção de acidez, logo esse comportamento de 0-20 cm pode ser explicado por essas práticas. Para CN e A2 as amostras são consideradas independentes no sistema de amostragem adotado. Campos et al (2003) e Maçaneiro (2001) também não encontraram semivariograma para Ca e Mg na mesma região.

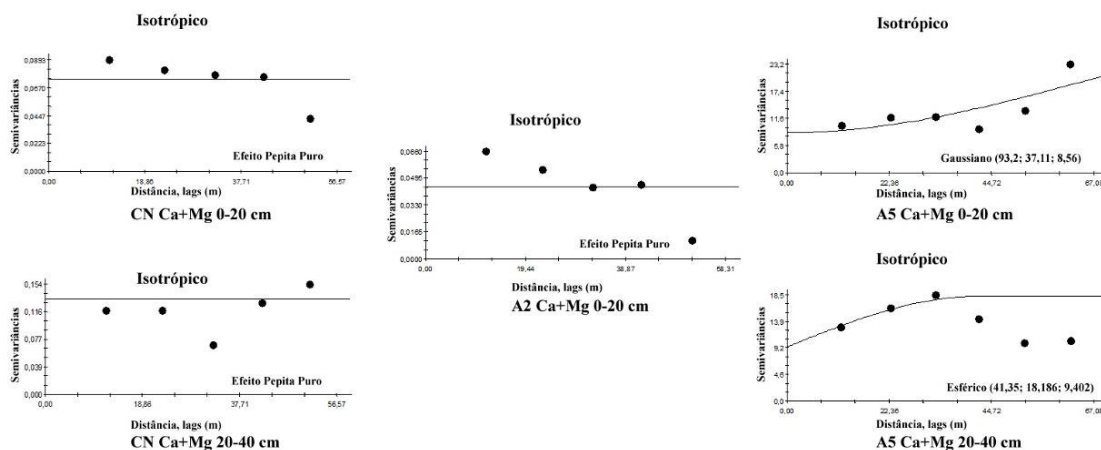


Figura 37 - Semivariogramas ajustados para **Ca+Mg** nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.

Os mapas temáticos para as variáveis químicas podem ser visualizados nas figuras 38 a 42. Para todas as variáveis considerou-se o modelo ajustado para o semivariograma e os casos de anisotropia e isotropia. Nos casos de E.P.P. apenas a grade de amostragem é apresentada. Os termos “altos ou maiores valores” e “baixos ou menores valores” utilizados na interpretação, correspondem aos intervalos de máximos e mínimos apresentados na escala. As letras entre parênteses ao lado dos intervalos de concentração significam, exceto para Al: Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M), Alto (A) e Muito Alto (MA), respectivamente. Interpretação de acordo com a CQFS - RS/SC (2004).

Nos mapas de pH (figura 38) a área A5 apresentou variação no comportamento em profundidade, conforme já comentado e a presença de anisotropia nessa área (45°) em 0 - 20 cm é claramente observada no sentido SO-NE. No CN houve um gradiente na direção N-S que pode estar relacionado à declividade do local. Comportamento semelhante foi encontrado por Lima et al. (2010) estudando uma área de vegetação nativa em Alegre, ES.

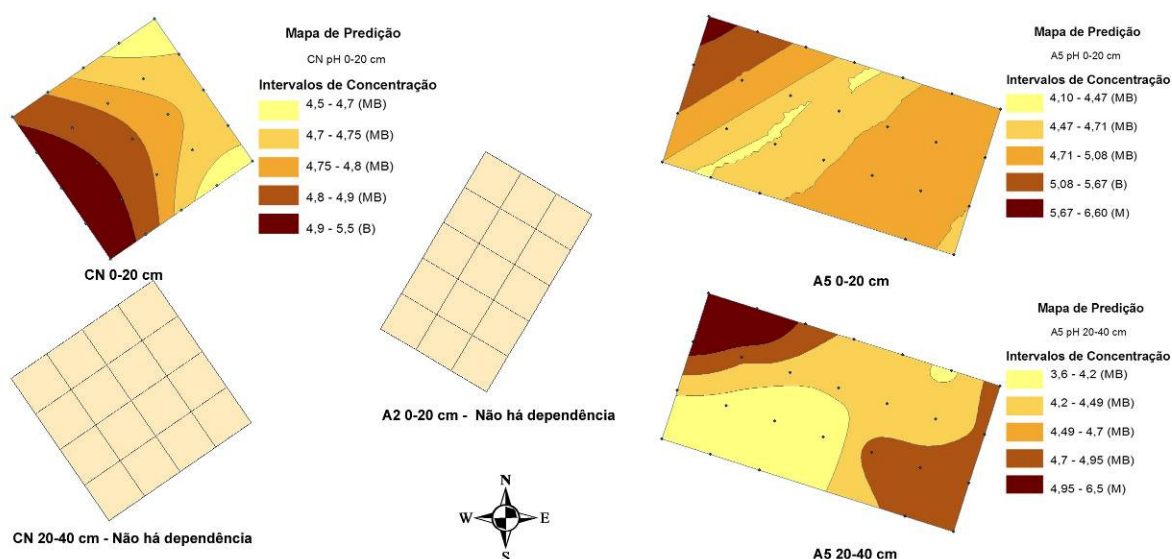


Figura 38 – Mapas temáticos para a variável pH nas três áreas e nas duas profundidades.

Nos mapas gerados para o K (figura 39) em CN verifica-se a tendência de valores altos na parte baixa do terreno, resultante do carreamento desse elemento nesta direção. Em A2, observou-se uma maior concentração nos bordos da área e uma menor concentração no centro, ocasionada provavelmente pela variabilidade espacial da profundidade e aos processos de construção topográfica, onde a deposição do K por lixiviação nesses locais pode ter sido facilitada. Já em A5, observa-se certa irregularidade em profundidade, onde há uma deposição mais concentrada desse elemento sob a superfície. Entretanto, para a profundidade de 20-40

cm onde foi detectada anisotropia, observa-se uma continuidade mais uniforme na direção de 90° (O-E).

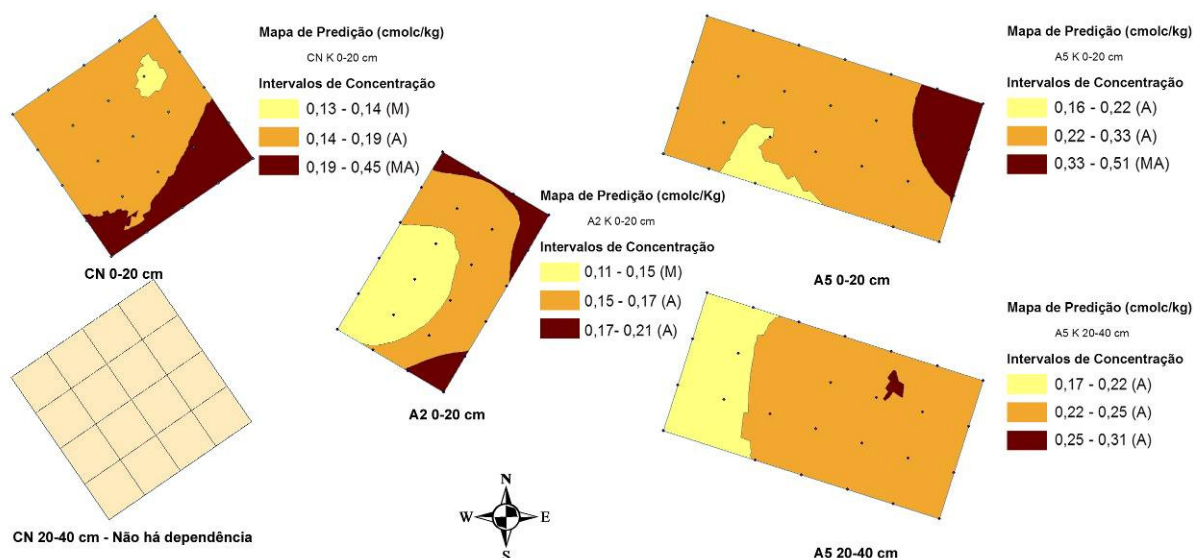


Figura 39 - Mapas temáticos para a variável K nas três áreas e nas duas profundidades.

Os maiores valores de P (figura 40) foram observados nos limites da área A5. Este mesmo comportamento ocorreu para o pH (figura 38), indicando uma correlação positiva entre as duas. À medida que o pH aumenta até aproximadamente 5,8 ocorrem várias reações no solo que beneficiam tanto a absorção de P, como o desenvolvimento vegetal (ERNANI, et al., 1996). Entretanto, para se analisar quantitativamente esta correlação em profundidade faz-se necessário o cruzamento dos dados nas duas profundidades, procedimento conhecido como tabulação cruzada (não tratada neste trabalho) (SPRING®, 2011).

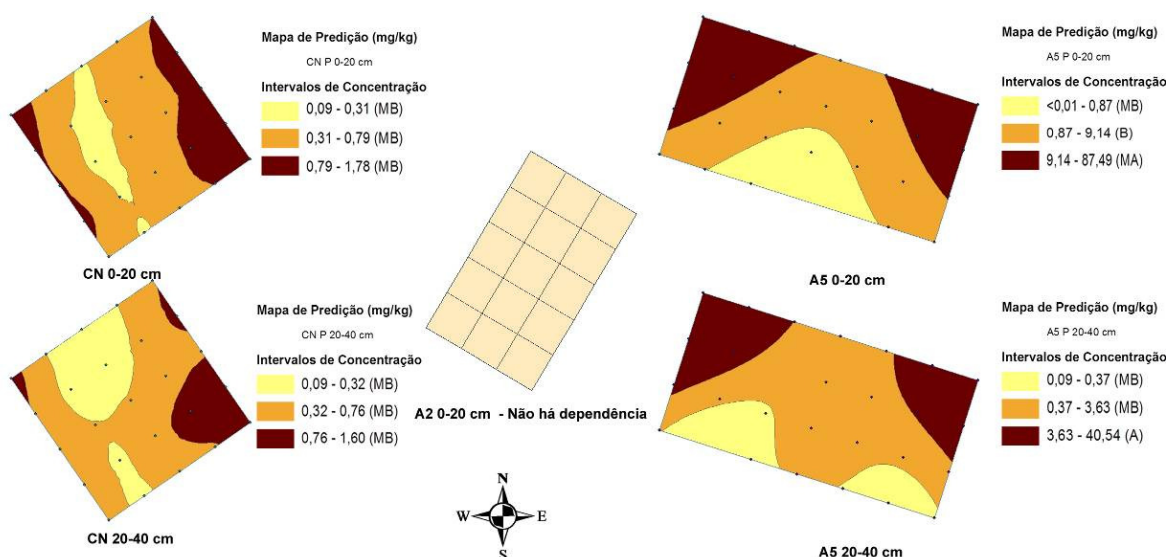


Figura 40 - Mapas temáticos para a variável P nas três áreas e nas duas profundidades.

Com relação aos teores de Al trocável (figura 41), nota-se no CN e A2 um gradiente de concentração que está relacionado ao baixo pH observado na mesma região. Segundo Johnston (2004) o efeito da toxicidade do Al^{+3} está intimamente ligado à diminuição do pH.

Na área A5 constata-se a existência de relação entre os teores de Al^{+3} , de P e os valores de pH. Na maioria dos solos com pH menor que 5,0 o Al é o cátion que normalmente predomina na CTC; naqueles com pH maior que 5,5, Ca e Mg normalmente ocupam mais de 90% das cargas (ERNANI, 2008).

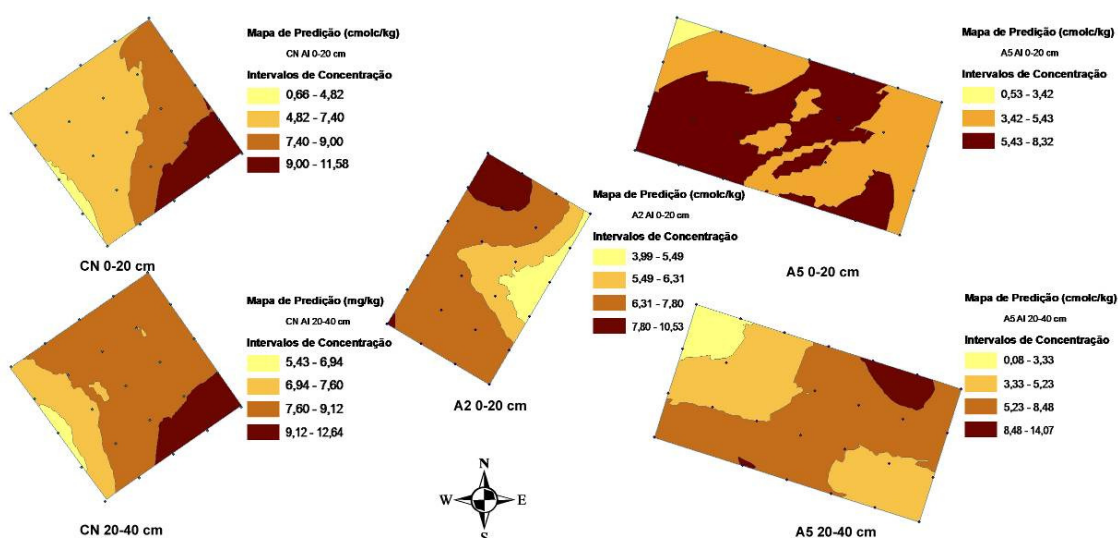


Figura 41 - Mapas temáticos para a variável Al nas três áreas e nas duas profundidades.

Para Ca+Mg (figura 42) os maiores valores para 0-20 cm distribuíram-se em forma de gradiente, com concentração desses elementos em uma das extremidades da área A5. Na profundidade de 20-40 cm, os maiores valores ocorreram na região central da área, provavelmente devido a lixiviação mais acentuada desses elementos, visto que não se tem informação de como os corretivos foram distribuídos na área.

Ernani (2008) e Luchese (2002) relatam que as quantidades de Ca e Mg lixiviadas são maiores em áreas que recebem calcário.

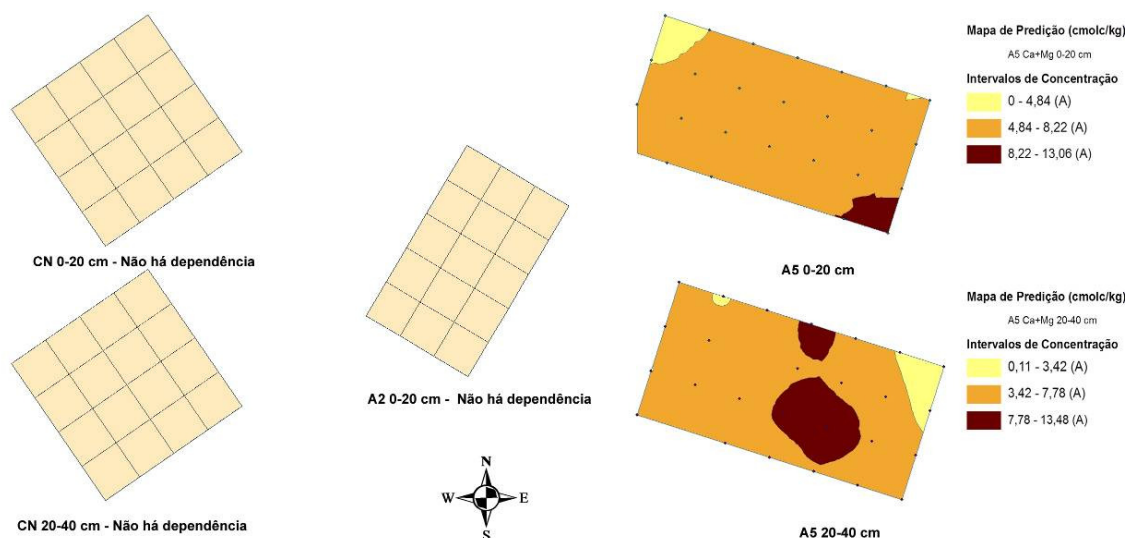


Figura 42 - Mapas temáticos para a variável Ca+Mg nas três áreas e nas duas profundidades.

3.2.1.2 Propriedades físicas

Os dados semivariográficos referentes aos teores de argila apresentaram-se na sua maioria independentes (tabela 4), ou seja, não possuem semivariograma ajustado (figura 43), exceto para a área A2 na profundidade de 0-20 cm e A5 em 20-40 cm. Nesta última foi constatada a presença de anisotropia na direção de 90°. Campos et al. (2003) e Nunes (2002) estudando áreas construídas após a mineração de carvão também encontraram semivariograma para a argila em algumas ocasiões e E.P. P. em outras.

Esta última situação é decorrente do modo de disposição dos materiais e devido principalmente a perda do sólum (horizonte A e B), durante o processo de construção. A falta de dependência espacial para essas áreas pode também estar relacionada à distância de amostragem utilizada (10 m), superior àquela adequada para detectar a presença de dependência espacial.

Tabela 4 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados dos teores de argila, nas três áreas estudadas e nas profundidades 0-20 cm e 20-40 cm.

Área	Modelo	Alcance (m)	Patamar	Pepita	Grau Dependência (%)	Classe	R ²	SQR
-----0-20 cm-----								
CN	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,27	80732
A2	Gaussiano	47,1	7726	1760	22,78	Forte	0,974	247547
A5	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,621	6956233
-----20-40 cm-----								
CN	Aleatório	..	..	..	..	E. P. P.	0,376	15334
A5	Gaussiano	[122,3-101,6]	68558	4490	6,55	Forte	0,741	1,53E+09

Os mapas temáticos relativos à variável argila são apresentados na figura 44. Somente dois mapas foram possíveis de serem elaborados nas áreas A2 e A5 na profundidade 20-40 cm. Houve presença de anisotropia na direção de 90° e nos dois casos os maiores valores de argila se concentraram em um dos vértices das áreas.

Lunardi et al. (2008) aplicando cama de aves em um solo construído após mineração de carvão, concluiu que este procedimento melhora as qualidades físicas do solo. Porém como não há informações de como este adubo foi distribuído espacialmente ao solo, sabendo-se somente que foi em superfície, pode-se dizer que a desuniformidade da aplicação pode ter sido a causa de um comportamento errático e foi a causa de não haver dependência na superfície (0-20 cm).

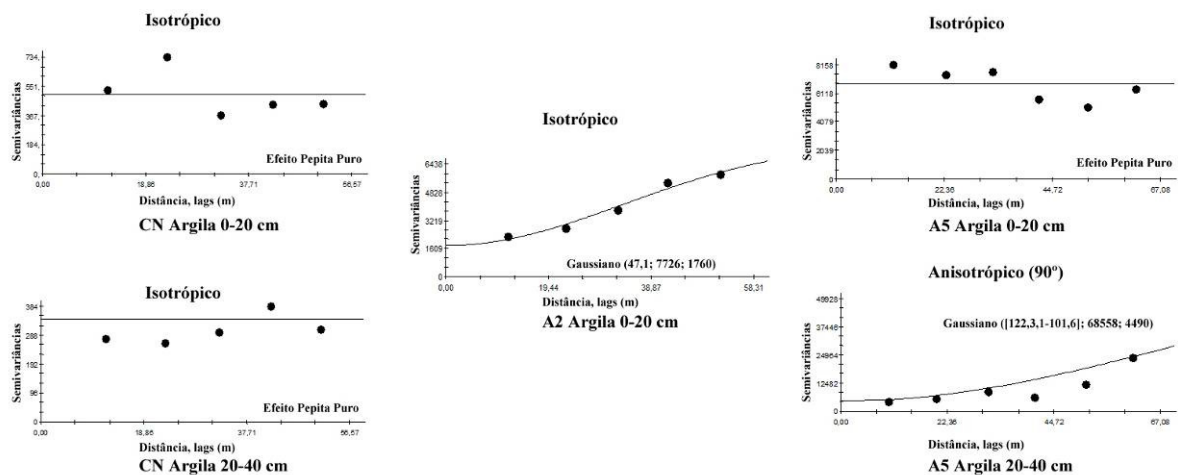


Figura 43 - Semivariogramas ajustados para argila nas três áreas e nas duas profundidades, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.

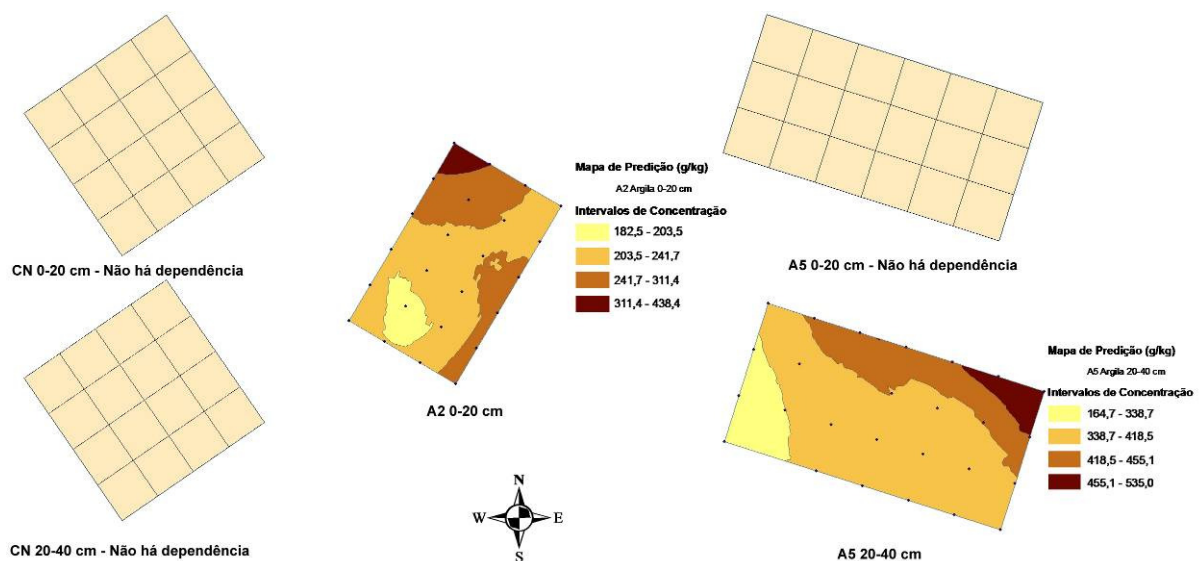


Figura 44 - Mapas temáticos para a variável argila nas três áreas e nas duas profundidades.

3.2.1.3 Análise da variação da profundidade na área A2

A análise descritiva da profundidade em A2 pode ser observada na tabela 5. O intervalo de profundidade variou de 10-40 cm em toda a área. Apesar de haver uma variabilidade em relação à profundidade de coleta, os valores numéricos não são tão caóticos, não havendo *outliers* nem extremos como pode ser observado na figura 45 (a).

Um mapa 3D (figura 45 (b)) da superfície tendo como eixo Z a variável profundidade, foi construído através da interpolação dos pontos da grade, executando o método da distância dos mínimos quadrados ponderados do software Statistica, com intuito de visualizar se há tendências na topografia da área.

Tabela 5 - Análise descritiva exploratória da profundidade (cm) na área A2.

	M	D.P.	ME	MÍN	MÁX	Q1	Q3	AS	CT
-----Mina A2 -----									
Profundidade	28,87	10,81	30	10	40	20	40	-0,19	-1,18

M=média; D.P.=desvio padrão; ME=mediana; MÍN=teor mínimo; MÁX=teor máximo; Q1=1º quartil; Q3=3º quartil; AS=assimetria; CT=curtose.

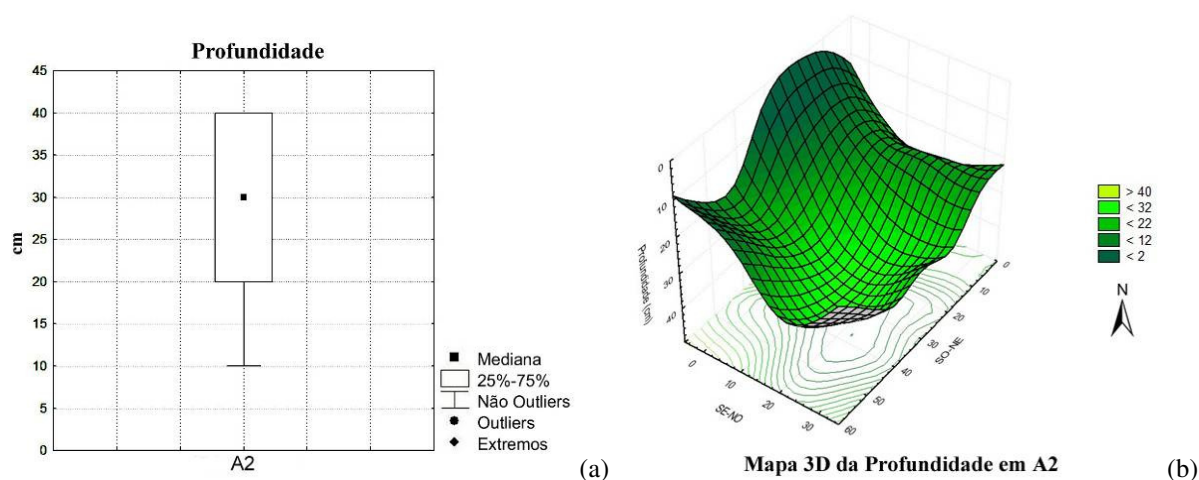


Figura 45 - Distribuição em box plot (a) e variabilidade em mapa 3D interpolado a partir dos pontos amostrados (b) da profundidade na área A2.

Foi ajustado um semivariograma do tipo esférico (figura 46) e isotrópico, com índice de dependência moderada e alcance de 67,54 m (tabela 6).

Tabela 6 - Análise exploratória geoestatística, com os parâmetros do semivariograma ajustado para a variável profundidade na área A2.

Área	Modelo	Alcance (m)	Patamar	Pepita	Grau Dependência (%)	Classe	R ²	SQR
-----10-40 cm-----								
A2	Esférico	67,54	220,86	62,60	28,34	Moderado	0,446	71270

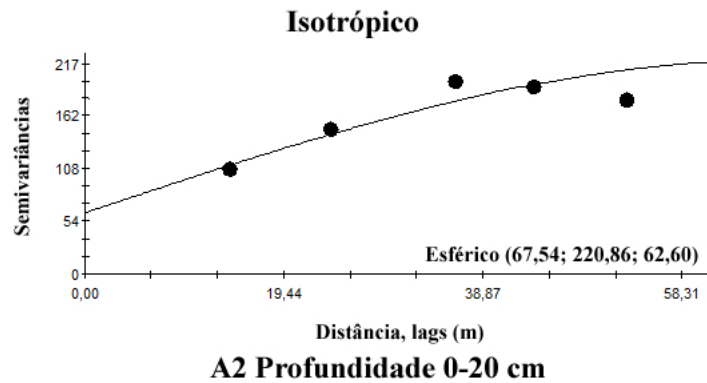


Figura 46 - Semivariograma ajustado para profundidade na área A2, com profundidade variando de 0-40 cm, valores entre parênteses, representam respectivamente o alcance, o patamar e o efeito pepita.

Através do semivariograma ajustado gerou-se o mapa temático (figura 47), no qual se pode observar um gradiente, concordando com o mapa em 3D (figura 45b). Este conhecimento pode ser útil no planejamento de amostragens futuras ou numa possível intervenção na área, pois nas profundidades menores, em que não foi possível coletar-se amostras, há um possível compartimento com maior pedregosidade.

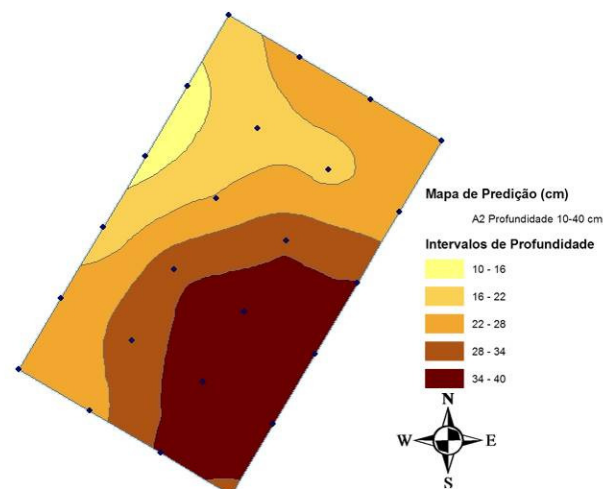


Figura 47 - Mapa temático para a variável profundidade na área A2.

3.2.1.4 Sistema de informações geográficas

Uma parte do sistema de informações geográficas (SIG) construído, no qual os dados estão armazenados e são gerenciados, pode ser visualizado na figura 48. O exemplo diz respeito à área A2 (0-20 cm) com todos os atributos no ponto 9 e com o mapa temático de A1 no plano de fundo. Neste tipo de sistema é possível, através de ferramentas específicas, elaborar-se a cartografia da área e se fazer diversas análises.

Segundo Camargo et al. (1996) um aspecto que deve ser ressaltado é a utilização da potencialidade do SIG na apresentação e análise dos resultados. Neste sentido, a integração geoestatística e SIG mostra-se extremamente conveniente e deve ser adotada sempre que possível como rotina em análises de dados espaciais, possibilitando métodos inferenciais com controle mais significativos sobre os parâmetros do interpolador usado.

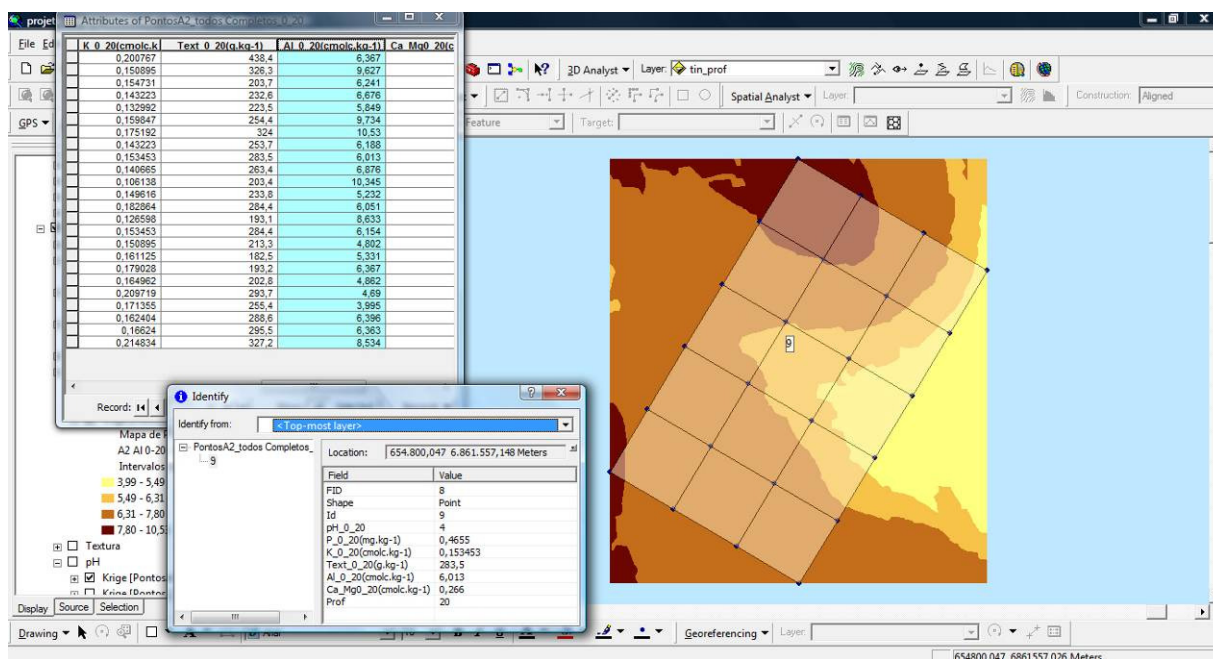


Figura 48 - Tela do sistema de informação geográfica construído neste trabalho, para A2.

4 CONCLUSÕES

Os solos naturais da região de estudo são naturalmente pobres quimicamente, principalmente no que diz respeito aos teores de Ca+Mg e P, e possuem baixos valores de pH e alta concentração de Al^{+3} ;

A construção topográfica das áreas mineradas resulta em uma alta variabilidade de seus atributos demonstrando que a análise de dados espaciais constitui-se numa estratégia mais adequada para modelar o comportamento desses dados;

A condução completa dos processos de construção topográfica e do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) das áreas pode ser evidenciada pelos altos teores dos elementos benéficos ao desenvolvimento vegetal da braquiária na área A5, que pode se considerada como uma área recuperada;

Com a geoestatística foi possível modelar o comportamento espacial dos atributos do solo para a maioria das áreas;

Algumas áreas apresentaram comportamento totalmente caótico (efeito pepita puro), para alguns atributos, não sendo possível a modelagem espacial, nas condições adotadas;

O plano amostral (grade 10x10 m) foi suficiente para a maioria das situações e o uso do SIG atendeu as expectativas (controle, análise, armazenamento, geração de mapas, etc.).

Novos estudos fazem-se necessário, com intuito de se analisar possíveis contaminações por metais pesados nessas áreas. Além de uma análise microbiológica, para se avaliar a qualidade da fauna presente nestes tipos áreas, bem como o cruzamento de dados em diferentes profundidades, para se verificar a independência dos dados verticalmente no solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como consideração final deste trabalho, sugere-se alguns estudos adicionais, com intuito de se analisar possíveis contaminações por metais nas áreas. Além de uma análise microbiológica, para se avaliar a qualidade da fauna do solo, bem como o cruzamento de dados em diferentes profundidades, para se verificar uma possível dependência dos dados verticalmente, contribuindo assim para uma caracterização qualitativa das áreas construídas.

Como complemento aos atributos já analisados, faz-se necessário também a determinação do potencial de acidificação, para se calcular a necessidade de calcário para as áreas, determinação de matéria orgânica e dos micronutrientes, bem como determinar alguns outros atributos físicos do solo, como: macro e microporosidade, densidade de partícula, densidade do solo, umidade, compactação e etc.

Os modelos de construção topográfica das áreas podem ser ajustados a cada situação, levando em consideração não somente o PRAD que é utilizado em toda bacia carbonífera, mas sim trabalhos científicos realizados nas áreas, ou na situação mais próxima possível.

Novas coletas de solo com o objetivo de amostragem independente podem levar em consideração os semivariogramas ajustados neste trabalho para as respectivas áreas.

Um monitoramento periódico da fertilidade das áreas juntamente com análises de tecido vegetal pode auxiliar na tomada de decisão para possíveis mudanças na estratégia de recuperação de áreas afetadas pela mineração de carvão a céu aberto.

REFERÊNCIAS

- ARZENO, J.L. **Avaliação física de diferentes manejos de solo em Latosolo Roxo-Distrófico**. 1990. 259 f. Tese (Doutorado em Solo e Nutrição de Plantas). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1990.
- BAILEY, T. C.; GATTREL, A. C. **Interactive spatial data analysis**. London: Prentice Hall, 1995. 432 p.
- BARNHISEL, R.I. et al. Characteristics and reclamation of acid sulfate mine spoil. In: KITTRICK, J.A.; FANNING, D.S. & HOSSNER, L.R., eds. **Acid sulfate weathering**. Madison, Soil Science Society America, 1982. p.37-56.
- BELOLLI, M.; QUADROS, J.; GUIDI, A. **A história do carvão em Santa Catarina 1790-1950**. V.1 Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 2002. 295 p.
- BIFFI, L. J. **Mapeamento e análise espacial de variáveis de produção de maçã conduzida sobre pomar comercial na região de São Joaquim- SC**. 108 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Centro de Ciências Agroveteriárias, CAV, Lages, 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Perfil analítico do carvão**. 2. ed. Porto Alegre, 1987. 140 p. (Boletim, 6).
- BRASIL, Código de Mineração. **Decreto Lei n.227 de 28 de fevereiro de 1967**. Art. 36. Disponível em: <http://www.dji.com.br/decretos_leis/1967-000227/000227-1967_036_a_058.htm>. Acesso em: 31 ago. 2010.
- BRANDÃO, W. Utilização de métodos geoestatísticos de krigeagem ordinária e krigeagem por indicação na interpolação de dados geoquímicos de solos: uma comparação. In: Seminário Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais do X SBSR Seminário Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE, 2001. p. 387-394.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1987.
- CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil proprieties in Central Iowa Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, 1994, 1501-1511 p.

CÂMARA, G. Anatomia de sistemas de informações geográficas: visão atual e perspectivas de evolução. In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E. **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: EMBRAPA, 1998. p.15-37.

CÂMARA, G.; DAVI, C. MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CAMILLO, M.F.; QUINONES, O.R.; INDA JUNIOR, A.V.; BISSANI, C.A. & GIASSEN, E. Propriedades químicas de solos construídos em áreas de mineração de carvão no município de Minas do Leão, RS. Solo: Alicerce dos Sistemas de Produção. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2003, Ribeirão Preto. **Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, Ribeirão Preto, 2003.

CAMARGO, E. C. G. CÂMARA, G. & MEDEIROS, J.S. de. Geoprocessamento em projetos ambientais. In: **Geoestatística: Fundamentos e aplicações**. São José dos Campos: INPE, 1996.

CAMPOS, M.L. **Caracterização de três áreas de solo reconstruído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, SC**. 2000. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Centro de Ciências Agroveterinárias, CAV, Lages, 2000.

CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A.; SOUZA, L. S. Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1123-1137, nov/dec. 2003.

CAMPOS, M. L. et al. Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v.9, n.2, p. 198-205, 2010

CASTRO, J.C et al. **Coluna White: Estratigrafia da Bacia do Paraná no Sul do Estado de Santa Catarina - Brasil**. Florianópolis: Secretaria de Estado de Tecnologia, Energia e Meio Ambiente, 1994. v.1. Disponível em < http://www.cprm.gov.br/coluna/roteiro_mapa.html>. Acesso em: 9 jan. 2011.

CAVALCANTE, E. G. S. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p. 1329-1339, nov/dec. 2007

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Science Publishers, 1979. 126 p.

CQFSRS/SC, COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.

COSTA, T. C. C.; FILHO, E. I. F. **Aplicação da geoestatística para seleção de unidades de amostra independentes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. Doc. n. 59, p. 34.

COSTA, S.; ZOCHE, J. J. Fertilidade de solos construídos em áreas de mineração de carvão na região sul de Santa Catarina. **Rev. Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.4, p.665-664, 2009.

CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil. **Apresenta informações sobre a história da exploração do carvão no Brasil**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/coluna/carvaomineral0.html>>. Acesso em: 31 ago. de 2010.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991.

DEUTSCH, C.; SCHNETZER, M. **Geostatistical software library**. Disponível em: <<http://www.gslib.com/>>. Acesso em> 18 out. 2010.

DANIELS, W.L. Manipulating the chemical properties of soil and mining wastes. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, p. 869-897, 1996.

ESRI. **Using ArcGIS™ Geostatistical Analyst. Manual e guia do usuário**. E-book. Disponível em: <http://dusk.geo.orst.edu/gis/geostat_analyst.pdf>. Acesso em: 18 out. 2010.

EMBRAPA. CNPS. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro , 1997. 212 p.

EMBRAPA. CNPS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

EPAGRI. Mapoteca digital. Disponível em: < <http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/> >. Acesso em: 02 fev. 2011.

ERNANI, P. R. **Química do Solo e Disponibilidade de Nutrientes**. 1. ed. Lages: UDESC 2008. 230 p.

ERNANI, P.R.; BAYER, C.; STECKLING, C. Características químicas de solo e rendimento de matéria seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 25, p. 939-946, 2001.

ERNANI, P.R.; FIGUEIREDO, O. R. A.; BECEGATO, V.; ALMEIDA, J. A. Decréscimo da retenção de fósforo no solo pelo aumento do pH. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 20, p. 159-162, 1996.

FARIAS, C.E.G. **Relatório preparado para o CGEE PNUD – Contrato 2202/001604.**

Disponível em: <

http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost_files/miner_c3_a7_c3_a3o_20e_20meio_20ambiente.pdf > Acesso em: 08 nov. 2002.

FRANCO, A. M. P. **Caracterização física de um solo construído na área de mineração de carvão em Candiota-RS.** 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2006.

GAIVIZZO L.H.B.et al. Potencial poluidor de rejeitos carboníferos. II-Efeitos da recuperação com camadas de solo sobre as plantas e a população microbiana. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, p.955-961, 2002.

GERMANI, D. J. **A mineração no Brasil. Relatório Final.** CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <

http://www.cgee.org.br/prospeccao/doc_arq/prod/registro/pdf/regdoc1023.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2010.

GOLÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. DA MATA; J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n.5, p. 1149-1157, 2001.

GONÇALVES, F. C. **Efeito de plantas de cobertura sobre os atributos físicos de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota-RS após três anos.** 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Solo). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2008.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation.** New York: Oxford University Press, 1997. 481 p.

GUEDES, L. P. C. **Otimização da amostragem espacial.** 2008. 143 f. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação). Universidade de São Paulo, ESALQ/USP, Piracicaba, 2008.

GUEDES, L. P. C. et al. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32 p. 2217-2226, 2008.

GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional**. Brasília, DF. Ministério das Minas e Energias, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1988, 145 p.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica aplicada**. Apostila. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Matemática. Núcleo de Estudos Estatísticos e Biométricos. Uberlândia-MG. Set. 2001. Disponível em:<
<http://solos.ufmt.br/docs/geoestatistica/apgeo1.pdf>>. Acesso: 03 dez. 2010.

IMAI, N. N. et al. Análise comparativa da interpolação por krigagem ordinária e krigagem por indicação no caso de ervas daninhas em cultura de soja. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2003, Belo Horizonte. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia - SBC, 2003. CD-ROM.

INDA, A. V. et al. Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 5, maio 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**, New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JOHNSTON, A. E. Soil acidity. Resilience and thresholds. In SCHIONNING, P., ELMHOLT, B.T., CHRISTENSEN (Eds.) **Managing soil quality. Challenges in Modern Agriculture**, CAB International: Wallingford, 2004, p. 35-46.

KÄMPF, N., SCHNEIDER, P., GIASSEN, E. Propriedades pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na Bacia Carbonífera do Baixo Jacuí. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 21, p. 79-88, 1997.

KLEIN, A. S. **Áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina: vegetação versus substrato**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado em ciências ambientais) Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal South African**. Institute Mining Metall, n. 52, p. 119-139, 1951.

LANDIN, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. São Paulo. Editora da Unesp, 2003.

LANDIM P.M.B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terra Didatica**, v. 2, n.1, p. 19-33, 2006.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solo. 3. ed. Campinas, SP, 1996, 83 p.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, Feb. 2010 .

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, R. B.; ROCHA, W.; OLIVEIRA, P. C.; QUARTEZANI, W.Z. Análise Espacial de Atributo Químicos do Solo e da Produção da Cultura Pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.). **Idesia**, Arica, v. 28, n. 2, agosto 2010 .

LONGLEY, P. A. et al. **Geographic Information System and Science**. London, UK, 2002. 453 p.

LOPES, R. P. et al. Estudos geoquímicos e estruturais aplicados à recuperação de áreas degradadas pela extração de carvão – Campo Morozini. In: X ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2004, Florianópolis. Anais do X Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Florianópolis: ENTMME, 2004, p. 697-704.

LUCHESI, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo: teoria e prática**. 2.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002. 182 p.

LUNARDI NETO, A. **Métodos para reabilitação de solos reconstruídos após a mineração de carvão**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em ciência do solo). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Centro de Ciências Agroveterinárias, CAV, Lages, 2006.

LUNARDI NETO, A. et al. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **R. Bras.Ci. Solo**, v. 32, n. 4, p. 1379-1388, 2008.

MAÇANEIRO, K. C. **Efeito da calagem e da adubação orgânica no estabelecimento de gramíneas em áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em LauroMüller, Santa Catarina**. 2001. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Centro de Ciências Agroveterinárias, CAV, Lages, 2001.

MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2002. p. 311-335.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics. Economic Geology**. El Paso, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

METHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Paris: Editions Technip, v.1, 1962, 334 p.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Les Cahiers du Centre de Morphologie mathématique. Fas. 5. C. G. Fontainebleau, 1971.

MENEZES, C. T. B. **Diagnósticos sócio-ambiental de áreas degradadas pela mineração de carvão para a construção de instrumentos de gestão pública ambiental: Aplicação da interface entre a área de proteção ambiental da baleia franca no estuário da bacia hidrográfica do Rio Urussanga**. Universidade do Extremo Sul Catarinense-UNESC. Projeto de Pesquisa. Criciúma, ago, 2009.

MONEGO, M. D.; RAMOS, P.; NEVES, M. Análise geoestatística de uma descarga de águas residuais. In: ACTAS DAS II JORNADA DE HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE. Porto, 2007. **Anais do II Jornada de Hidráulia, Recursos Hídricos e Ambiente**. Porto: Out. 2007, 10-25 p.

MONTEIRO, K. V. **Carvão: o combustível de ontem**. Porto Alegre: Núcleo de Amigos da Terra Brasil, 2004. 82 p.

MUDROCH, A.; STOTTMEISTER, U; KENNEDY, C. ;KLAPPER, H. **Remediation of abandoned surface coal mining sites**. Springer, New York, 2002.

NEVES, J.; SAMBUGARO, M. L. Viagem de estudos à bacia carbonífera do estado de Santa Catarina. **Rev. Discentes Expressões Geográficas**. Florianópolis: n.2 p.145-164, jun. 2006.

NUNES, M. C. D. **Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas, 2002.

ORTIZ, G. da C. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial das variáveis físicas do solo**. 2002. 95 f. Dissertação

(Mestrado em Estatística e Experimentação) Universidade de São Paulo, ESALQ/USP, Piracicaba, 2002.

PANNATIER, Y. Variowin. **Software for spatial data analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 1996. 90 p.

PINTO, L. F. S. **Potencial de acidificação e neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão**. Tese. (Doutorado em Agronomia – Ciências do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRG, Porto Alegre. 1997.

PITCHEL, J.R.; DICK, W.A.; SUTTON, P. Comparison amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands. **J. Environ. Qual.**, v. 23, p.766-772, 1994.

POMPÊO, M. L. M. et al. Qualidade da água em região alterada pela mineração de carvão na microbacia do rio Fiorita (Siderópolis, Estado de Santa Catarina). **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 26, n.2, 2004.

PREVEDELLO, B.M.S. **Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo. ESALQ/USP, Piracicaba, 1987. 166 p.

QUIÑONES, O.R.G. **Caracterização e gênese de solos construídos após a mineração de carvão na Mina Boa Vista, Município de Minas do Leão, RS**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2004. 119 p.

QUIÑONES, O.R.G. et al. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e a composição do material utilizado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.6, p.1564-1571, 2008.

RIBEIRO, P. N. B; CAMPOS, M. L.; SILVEIRA, C. B.; PELOZATO, M.; RAMOS, V. A. Potencial de acidificação e teores de cádmio, chumbo, cobre e zinco em solos construídos pós-mineração de carvão a céu aberto no município de Lauro Muller, Santa Catarina. In: VII REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Santa Maria, RS, 2008. **Anais da VII Reunião Sul-brasileira de Ciência do Solo**. Santa Maria, RS, nov. 2008. CD-ROM.

SANCHEZ, J. C. D.; FORMOSO, M. L. L. **Utilização do carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: CIENTEC, 1990. 77p.

SÁNCHEZ, L.E. Projetos de recuperação: usos futuros e a relação com a comunidade. In: I Encontro de Mineração no Município de São Paulo. São Paulo, 1994. **Anais do I Encontro de Mineração no Município de São Paulo**. São Paulo: Secretaria das Administrações Regionais da Prefeitura do Municipal de São Paulo, 1994. p. 53-73.

SANTA CATARINA. SECRETARIA DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, DAS MINAS E ENERGIA. **Diagnóstico do carvão mineral catarinense**. Florianópolis, 1990. 77 p.

SANTA CATARINA. **Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral**. Subchefia de Estatística. Atlas de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173 p.

SEYBOLD, C. A. et al. Evaluating soil quality on reclaimed coal mine soils in Indian. In: National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force. **Anais do XXII National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation**, abril, 2004. p. 1644-1663.

SCHAFER, W.M.; NIELSEN, G.A. & NETTLETON, W.D. Minesoil genesis and morphology in a spoil chronosequence in Montana. **Soil Sci. Soc. Am. J**, v.44, p.802-807, 1980.

SCHEIBE, L. F. O carvão em Santa Catarina: Mineração e consequências ambientais. In: TEIXEIRA, E.C. & PIRES, M.J.R. (Coord). **Meio ambiente e carvão - impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental. FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/UFSC/FEPAM, 2002. P. 45-68.

SILVA, G. **Métodos auxiliares para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícola**. 2002. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). FEAGRI, UNICAMP, Campinas-SP, 2002.

SILVA, J. X. MEIRELLE, M. S. P. Geoprocessamento em Estudos Ambientais. In: MEIRELLES, M. S. P. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007, p. 23-24.

SOARES, E.R. et al. Cinza e carbonato de cálcio na mitigação de drenagem ácida em estéril de mineração. **R. Bras. Ci. Solo**, v.30 p.171-181, 2006.

SOARES, E.R. et al. Efeito da compactação e CaCO₃ na oxidação da pirita em estéril de mineração de carvão. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.26, p.65-73, 2002.

SOUZA, L. S. **Variabilidade do solo em sistemas de manejo**. 1992. 162 f. Tese (Doutorado em ciência do solo - Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, 1992.

SPIAZZI, F. R.; MIQUELLUTI, D.; CAMPOS, M. L.; HUGEN, C. Estudo comparativo do uso e ocupação do solo em diferentes épocas em uma área de mineração em Lauro Muller. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Fortaleza, 2009. **Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Fortaleza: SPH Comunicação Visual, 2009. p. 229-230.

SPRING, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Divisão de Processamento de **Imagens**. Ajuda Online. São José dos Campos, Brasil. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>>. Acesso 03 jan. 2011.

TAYLOR, R.W.; IBEABUCHI, I.O.; SISTANI, K.R. Accumulation of some metals by legumes and their extractability from acid mine spoils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.21, n.2, p.176-180, 1992.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38, n.1 p.45-94, 1985.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-53.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 15, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S. R. **Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM CONSERVAÇÃO DO SOLO, 1995. Apostila. Campinas: IAC, 1995. 68 p.

WEISS, A. L. et al. Classificação geomecânica em projetos de reforço do teto em mineração de carvão. **R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 57, n.2, 93-98, abr/jun. 2004.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **R. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, Dec. 2008.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. **Pedogenesis and soil taxonomy. I concepts and interactions**. Amsterdam: Elsevier, v.1, 1983. p.83-116.

WORLD COAL INSTITUTE. **Resources: Coal statistics**. Disponível em:<
<http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/>>. Acesso em: 30 ago. 2010.

APÊDINCE

Tabela 7 - Resumo das estatísticas dos erros da validação cruzada

pH					
Área	M	RQQME	EPK	MP	EPMP
0-20					
CN	0,00156	0,1748	0,134	0,004986	1,295
A5	0,004226	0,553	0,4575	0,02064	1,216
-----20-40-----					
A5	-0,01547	0,631	0,6102	-0,01972	1,035
K					
0-20					
CN	-0,0009	0,06134	0,02657	0,02624	1,507
A2	-0,0016	0,02266	0,02295	-0,05151	0,9771
A5	-0,0011	0,09541	0,009246	-0,00616	1,017
-----20-40-----					
A5	-0,001868	0,03515	0,0271	-0,08776	1,313
P					
0-20					
CN	-0,02702	0,311	0,3427	-0,50898	0,8929
A2	-0,8044	9,14	5,1	-0,03169	1,155
-----20-40-----					
CN	-0,01864	0,2963	0,3121	-0,04537	0,9433
A5	-0,6749	6,878	3,792	-0,05411	1,21
Al					
0-20					
CN	0,07788	2,128	1,85	0,02416	1,112
A2	-0,05783	1,445	1,125	-0,02544	1,203
A5	0,09505	1,639	0,972	0,03765	1,33
-----20-40-----					
CN	-0,02245	1,736	1,433	-0,00016	1,18
A5	-0,07794	1,182	0,972	-0,03104	0,906
Ca+Mg					
0-20					
A5	0,08475	2,029	2,686	0,01524	0,1171
-----20-40-----					
A5	0,03348	4,008	4,462	0,009985	0,9427
Argila					
0-20					
A2	-2,521	51,58	51,73	-0,02616	0,9725
-----20-40-----					
A5	-1,148	80,76	76,9	-0,01647	1,073
Profundidade					
-----10-40-----					
A2	0,1529	8,843	9,982	0,008798	0,9119

M: média dos erros, para a respectiva unidade da variável, RQQME: raiz quadrada do quadrado médio do erro, EPK: erro padrão de krigagem, MP: média padronizada e EPMP: erro padrão da média padronizada.

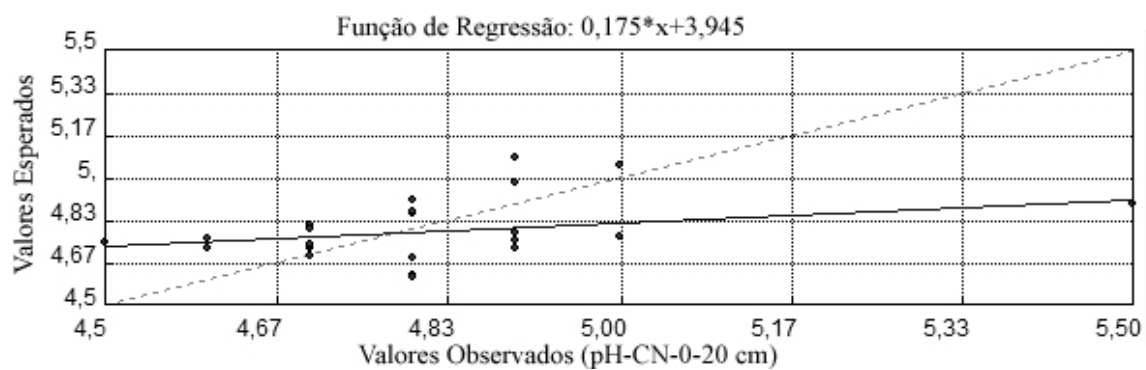


Figura 49 - Resultado da validação cruzada para o pH de 0-20 cm em CN.

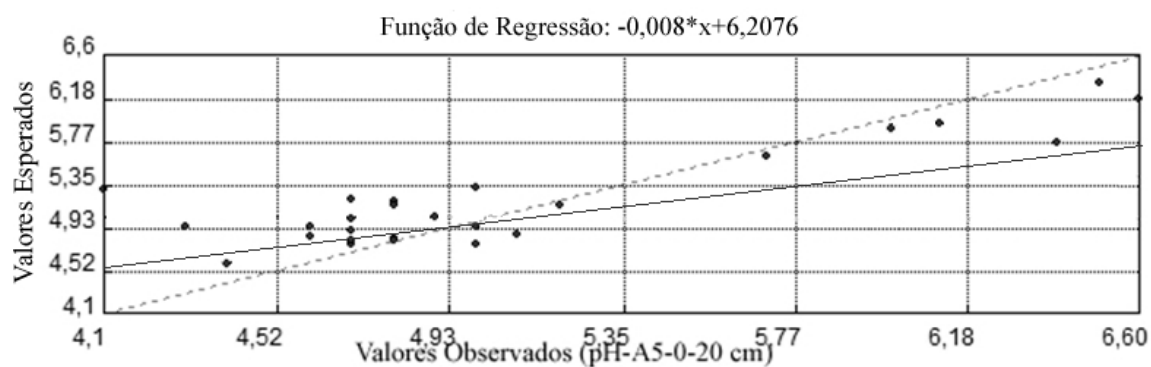


Figura 50 - Resultado da validação cruzada para o pH de 0-20 cm em A5.

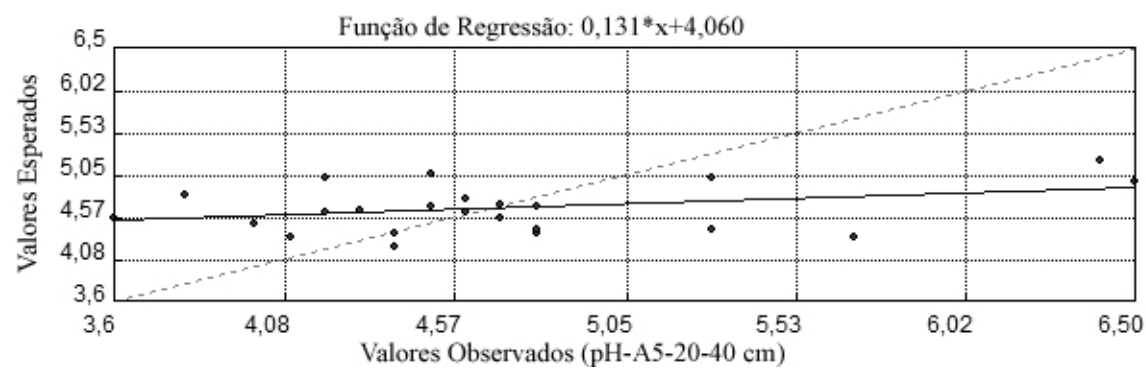


Figura 51 - Resultado da validação cruzada para o pH de 20-40 cm em A5.

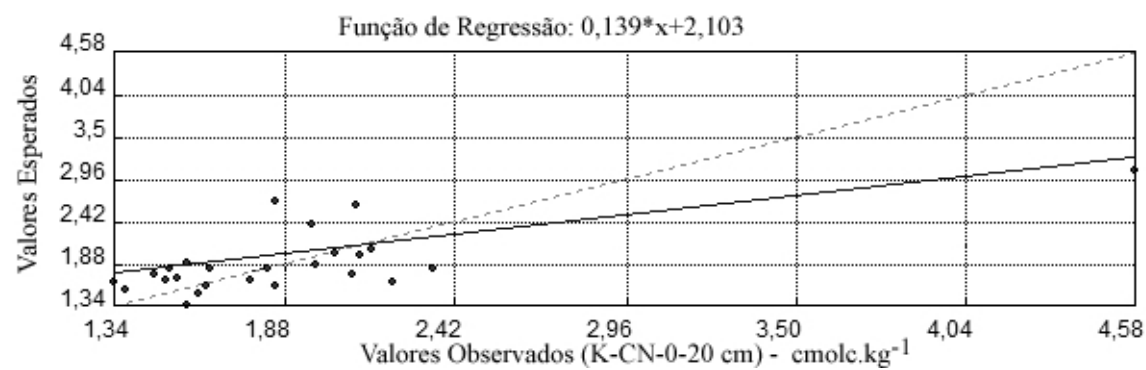


Figura 52 - Resultado da validação cruzada para o K de 0-20 cm em CN (escala 10^{-1}).

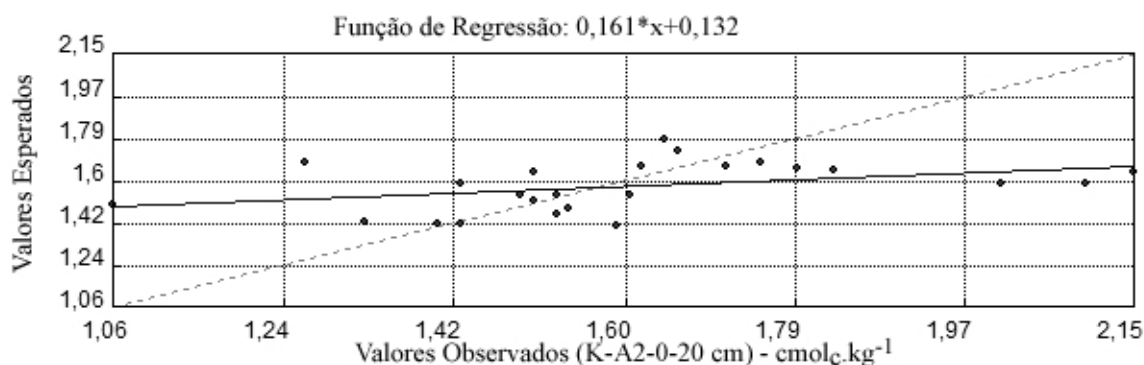


Figura 53 - Resultado da validação cruzada para o K de 0-20 cm em A2 (escala 10⁻¹).

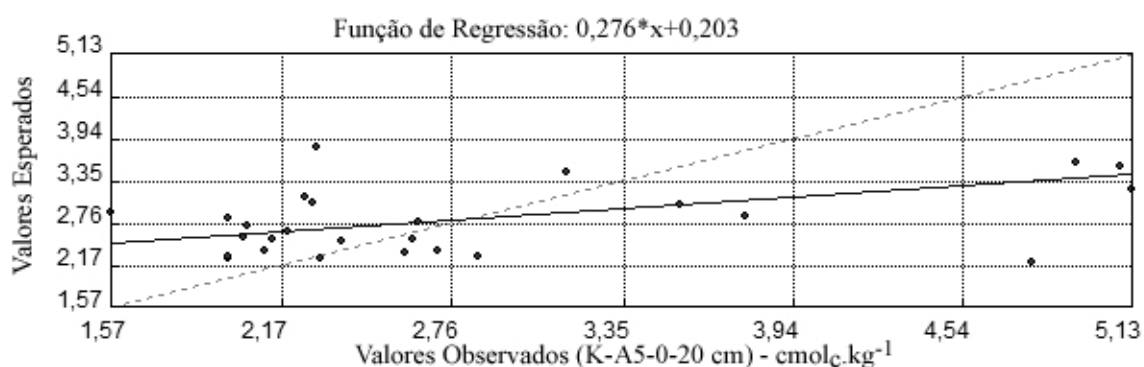


Figura 54 - Resultado da validação cruzada para o K de 0-20 cm em A5 (escala 10⁻¹).

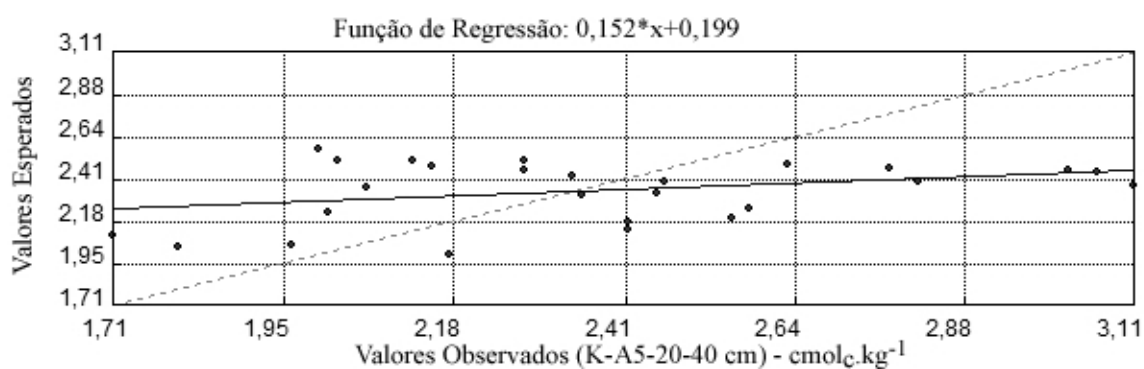


Figura 55 - Resultado da validação cruzada para o K de 20-40 cm em A5 (escala 10⁻¹).

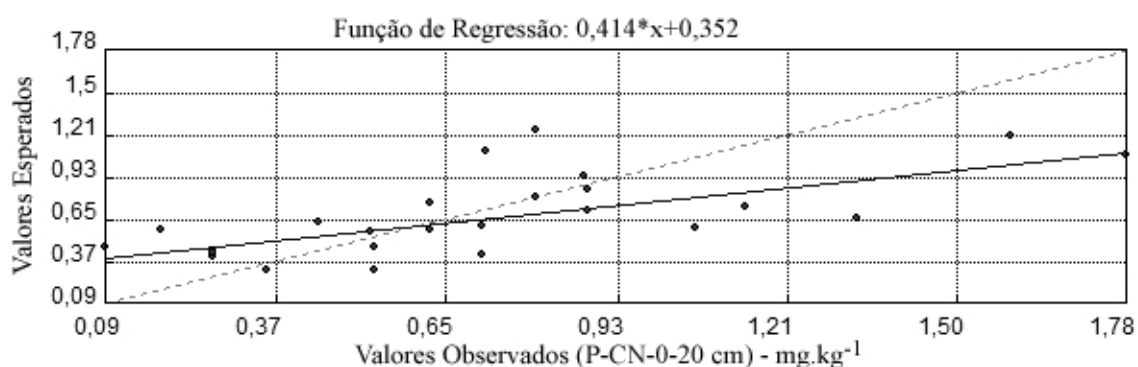


Figura 56 - Resultado da validação cruzada para o P de 0-20 cm em CN.

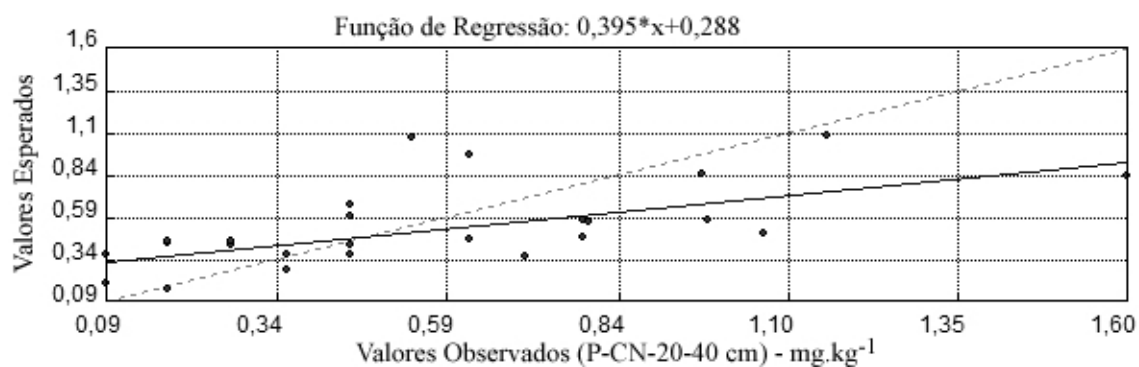


Figura 57 - Resultado da validação cruzada para o P de 20-40 cm em CN.

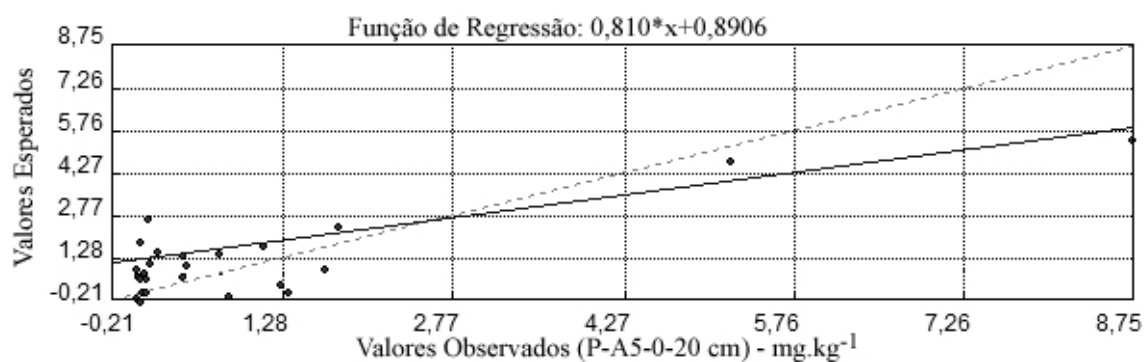


Figura 58 - Resultado da validação cruzada para o P de 0-20 cm em A5 (escala 10^{+1}).

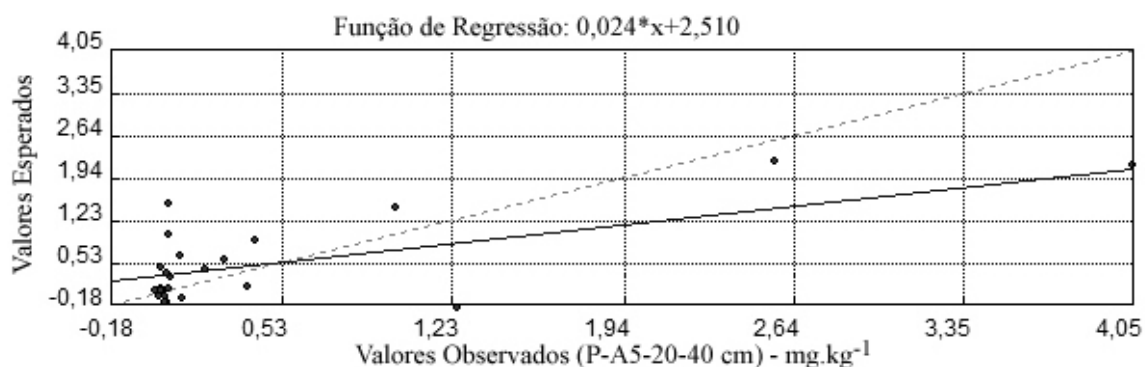


Figura 59 - Resultado da validação cruzada para o P de 0-20 cm em A5 (escala 10^{+1}).

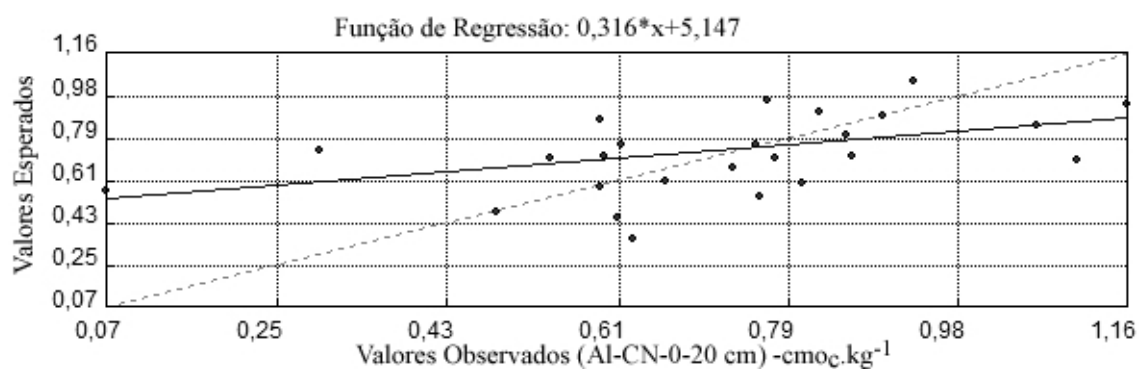


Figura 60 - Resultado da validação cruzada para o Al de 0-20 cm em CN (escala 10^{+1}).

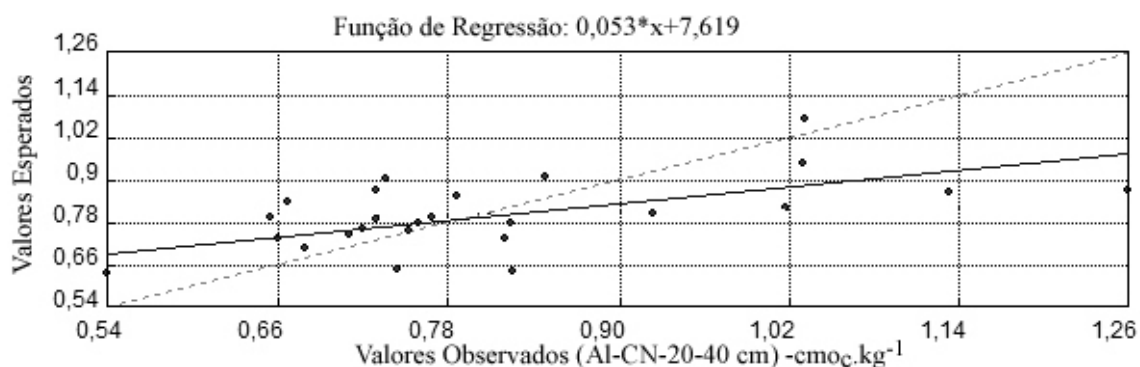


Figura 61 - Resultado da validação cruzada para o Al de 20-40 cm em CN (escala 10⁺¹).

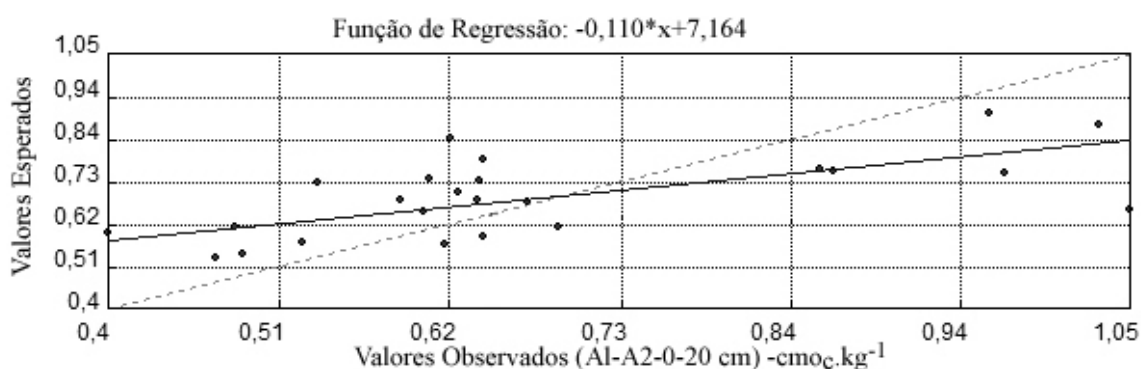


Figura 62 - Resultado da validação cruzada para o Al de 0-20 cm em A2 (escala 10⁺¹).

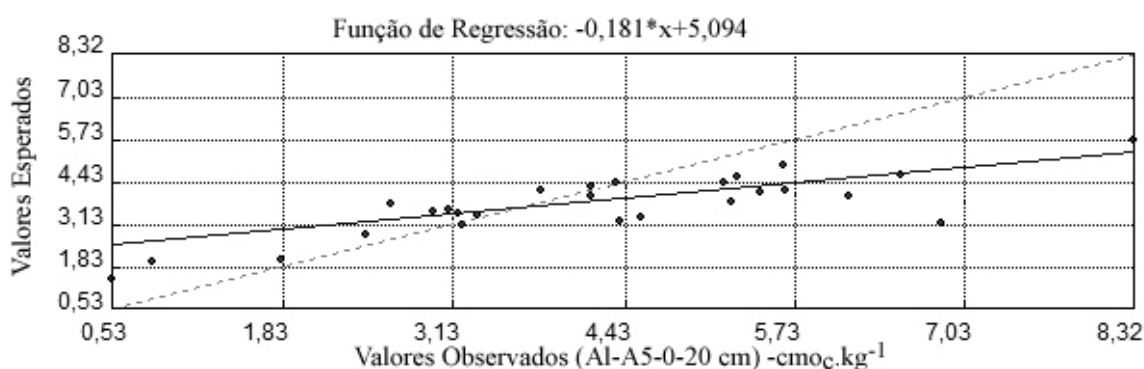


Figura 63 – Resultado da validação cruzada para o Al de 0-20 cm em A5.

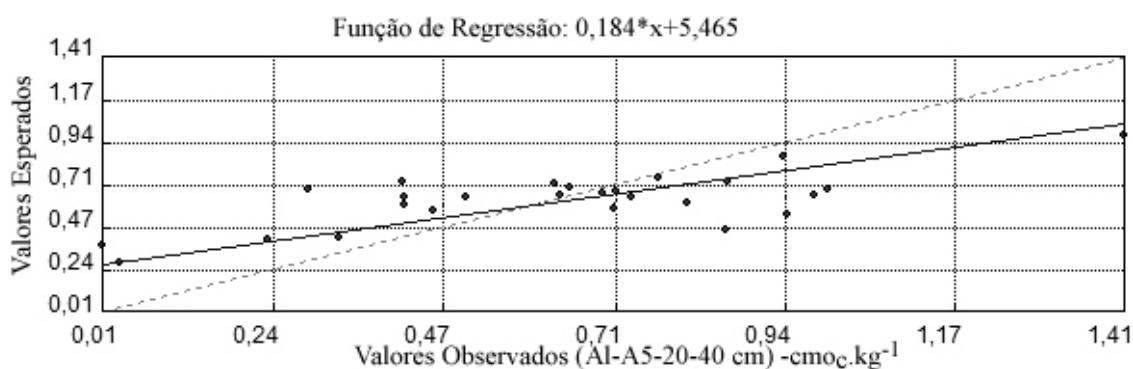


Figura 64 – Resultado da validação cruzada para o Al de 20-40 cm em A5 (escala 10⁺¹).

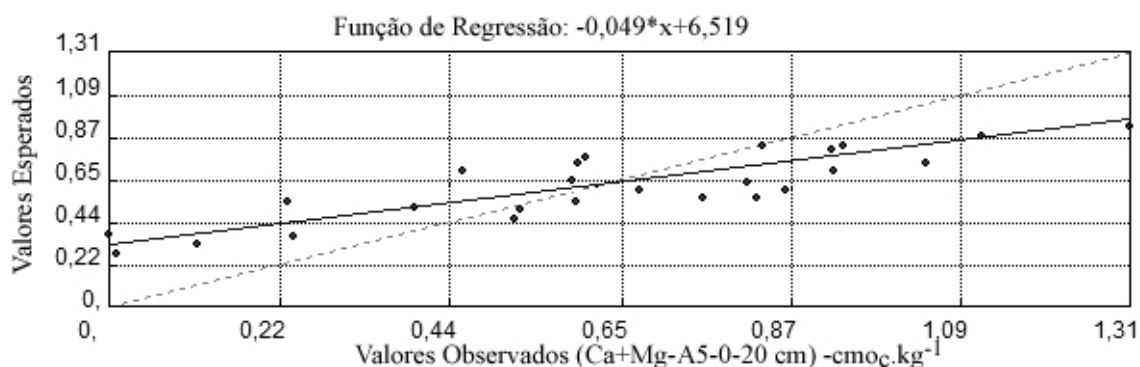


Figura 65– Resultado da validação cruzada para o Ca+Mg de 0-20 cm em A5 (escala 10⁺¹).

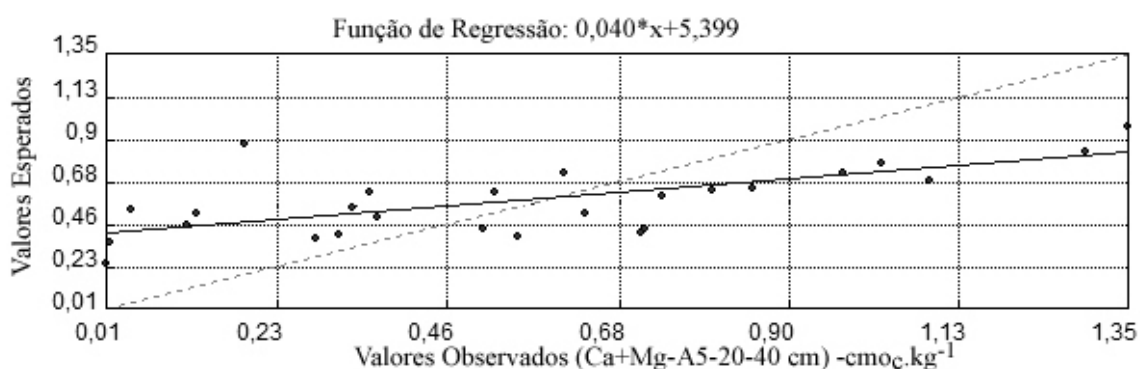


Figura 66– Resultado da validação cruzada para o Ca+Mg de 20-40 cm em A5 (escala 10⁺¹).

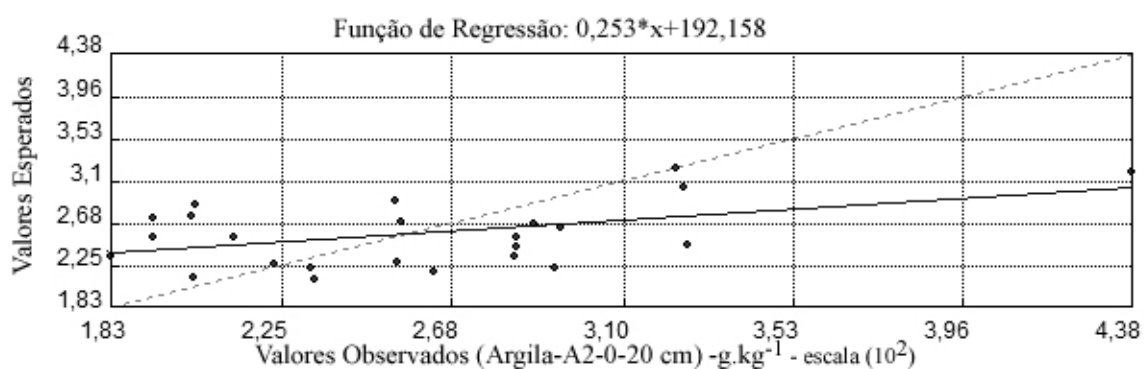


Figura 67 - Resultado da validação cruzada para a Argila de 0-40 cm em A2(escala 10⁺²).

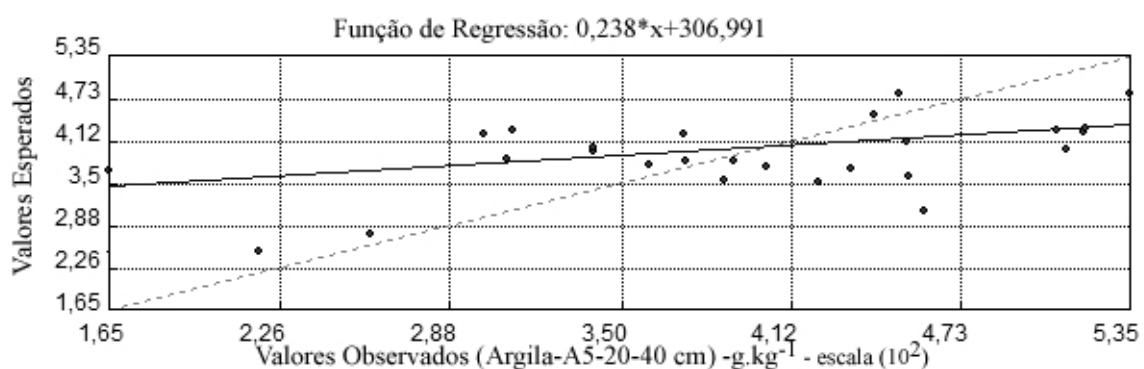


Figura 68 - Resultado da validação cruzada para a Argila de 20-40 cm em A5(escala 10⁺²).

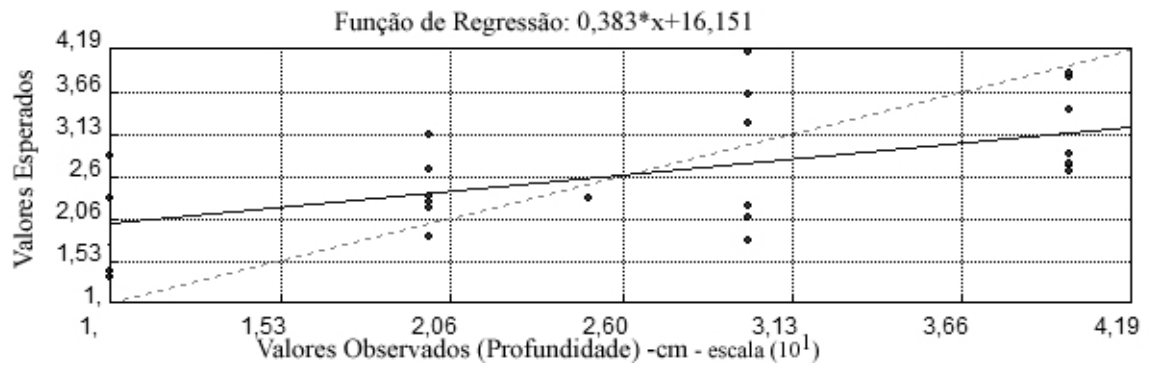


Figura 69 - Resultado da validação cruzada para a Argila de 10-40 cm em A2 (escala 10^1).