

**Centro de Estudos Gerais
Instituto de Química
Doutorado em Geoquímica Ambiental**

**MAPEAMENTO DIGITAL DA FERTILIDADE
DO SOLO DAS REGIÕES NORTE, NOROESTE E
SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

Sandra Fernandes de Andrade

**Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cacilda Nascimento de Carvalho
Co-Orientadora: Dr^a. Maria de Lourdes Mendonça Santos**

**NITERÓI
2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOQUÍMICA
AMBIENTAL**

**MAPEAMENTO DIGITAL DA FERTILIDADE
DO SOLO DAS REGIÕES NORTE, NOROESTE E
SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

TESE DE DOUTORADO

SANDRA FERNANDES DE ANDRADE

**Niterói, RJ
2010**

DEDICO:

Aos meus Pais Severino e Severina

Meus Irmãos Nicelma e Thiago

Meu Noivo Luciano

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao **Pai Celestial**, por ter dado forças para vencer mais essa etapa da minha vida.

Minha Família, pelo constante apoio e carinho. Principalmente aos meus amados pais que tanto se sacrificaram para que eu pudesse chegar até esse momento.

Professora Dr^a. Cacilda Nascimento de Carvalho, pela orientação, dedicação e amizade e pela solidariedade nas horas de dificuldade. Levarei comigo todos os seus ensinamentos e conselhos.

Dr^a. Maria de Lourdes Mendonça-Santos, pelo apoio, pois sem ele não seria possível a realização deste trabalho. Agradeço também pela amizade, atenção e incentivo.

Ao Ricardo Dart da Embrapa-Solos, meu querido amigo e companheiro, seu apoio foi fundamental em diversos momentos. Tenho uma profunda admiração e carinho por você.

Ao Jerônimo da Embrapa-Solos pelo seu apoio e amizade.

Ao pesquisador Dr. Waldir Carvalho Júnior, também da Embrapa-Solos por sua valiosa ajuda, apoio, incentivo e paciência.

Ao pesquisador da Embrapa Dr. Daniel, pelo apoio, atenção e disponibilidade.

Aos pesquisadores da Embrapa – Solos, Dr. José Francisco Lumbreras e ao Mário L.D. Aglio, pela valiosa colaboração durante o decorrer deste estudo.

Aos colegas do LGI da Embrapa – Solos pelo apoio e amizade.

Aos Professores do Curso de Doutorado, principalmente, os Professores Wilson Machado e John Maddock e a todo corpo técnico-administrativo do Departamento de Geoquímica - UFF, pela colaboração. Ao professor Marcelo Bernardes pelo apoio a concessão da bolsa. E ao secretário Nivaldo pela atenção e carinho.

À FAPERJ pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para execução deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação Geoquímica
Universidade Federal Fluminense

Mapeamento Digital da Fertilidade do Solo das regiões Norte, Noroeste e Serrana do Estado do Rio de Janeiro

O desenvolvimento de métodos de mapeamento digital de solos tem sido uma atividade que vem crescendo muito nas últimas décadas. O Mapeamento Digital de Solos está evoluindo crescentemente, desde a fase de investigação até a produção de mapas em diversas escalas abrangendo países, regiões e bacias hidrográficas. A predição de classes e propriedades de solos no mapeamento digital fundamenta-se nas relações existentes entre os fatores e processos de formação dos solos. O conhecimento dos atributos químicos dos solos é um fator de grande relevância, visando a utilização racional de corretivos e fertilizantes. Esta proposta tem como área de estudo, as regiões mais produtivas do Estado do Rio de Janeiro: Norte, Noroeste e Serrana. Neste projeto foram usados os dados de solos sistematizados pela Embrapa Solos para fins de estimativas de carbono (C), capacidade de troca catiônica (CTC), pH em água, saturação por alumínio (Alm%), saturação por base (V%), potássio (K^+) e fósforo (P). A análise exploratória dos dados identificou valores extremos, pela análise do sumário estatístico e dos gráficos *box-plot* das variáveis. Além desta análise foi realizada no programa *JUMP*® 6.0, através da correlação das variáveis de cada região com análise de histograma e estatística descritiva, onde também foram identificados alguns valores discrepantes em algumas das variáveis nas três regiões uma análise dos dados auxiliares. Para a formação do banco de dados auxiliares foram utilizadas as seguintes variáveis: elevação, aspecto, declividade, curvatura do plano, curvatura do perfil, índice de umidade, NDVI, tipo de solo e bandas Landsat7 2, 4 e 7. Esta análise melhorou o resultado da regressão linear múltipla (RLM). Os parâmetros estatísticos analisados para avaliação dos modelos de RLM foram: AIC, RMSE, Cp, R^2 - ajustado, F e a probabilidade de F. A regressão + krigagem mostrou-se um método importante para o mapeamento digital de propriedades do solo. Neste trabalho os solos analisados apresentam baixo pH (solos ácidos) e altos níveis de saturação por Al, bem como baixas concentrações de fósforo. Os valores de CTC e V (%) foram considerados bons para a fertilidade do solo, segundo dados da literatura. O carbono apresentou níveis considerados bons para a fertilidade do solo, principalmente, nas áreas de baixada da região Norte.

Palavras chaves: mapeamento digital, regressão - krigagem e fertilidade solo.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação Geoquímica
Universidade Federal Fluminense

Digital soil fertility mapping of the North, Northwest and Serrana regions of Rio de Janeiro State

The development of methods for digital mapping of soils has been a dramatically increasing activity in recent decades. Digital Soil Mapping has been developing increasingly, from the research phase to the production of maps at various scales covering countries, regions and river basins (Lagacherie and McBratney, 2007). The prediction of classes and properties of soils in digital mapping is based on the relationships between the factors and processes of soil formation. Knowledge of the chemical attributes of soils is a factor of great importance, aimed at rational use of fertilizers. The study area this proposal is aimed at are the following regions: North, Northwest Mountainous and the State of Rio de Janeiro, which are located between coordinates 43 ° 22'35"; 57'27"WG 40 ° and 20 ° 45 '47"; 34'21"S 22 °, with 22 043 km². In this project, data were used to soil systematized by Embrapa Solos for estimates of carbon (C), cation exchange capacity (CEC), pH in water, aluminum saturation (Alm%), base saturation (V%), potassium (K +) and phosphorus (P). The exploratory data analysis identified extreme values, by examining the summary statistics and box-plot graphs of the variables. In addition to this analysis, an analysis of ancillary data in the program JUMP ® 6.0 was achieved, through the correlation of variables in each region with histogram analysis and descriptive statistics, where some outliers in some of the variables in the three regions were identified. In order form the database, the following auxiliary variables were used: elevation, aspect, slope, curvature plan, curvature profile, wetness index, NDVI, soil type and bands Landsat 7 2, 4. This analysis improved the result of multiple linear regression (MLR). The statistical parameters analyzed for the MLR models were: AIC, RMSE, Cp, R² - adjusted F and probability of F. Regression - kriging has proved to be an important method for digital mapping of soil properties. The analyzed soils have low pH (acid soils) and high levels of Al saturation and low concentrations of phosphorus. The values of V (%) and CTC were considered good for soil fertility, according to data from literature. The carbon levels have been considered to be good for soil fertility, mainly in the lowland areas of the North.

Keywords: digital mapping, regression-kriging and soil fertility.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.1: Extensão e distribuição dos solos no Brasil e nas suas regiões.....	26
Tabela 2.1.2: Aptidão das terras do Brasil por região e por nível de manejo para os diferentes tipos de usos indicados.....	29
Tabela 3.2.1: Faixas das variáveis químicas para a fertilidade dos solos pelos autores citados.....	70
Tabela 4.1.1: Resumo Estatístico das variáveis na região Norte, na camada de 0-10 cm.....	73
Tabela 4.1.2: Resumo Estatístico das variáveis na região Noroeste, na camada de 0-10 cm.....	77
Tabela 4.1.3: Resumo Estatístico das variáveis na região Serrana, na camada de 0-10 cm.....	82
Tabela 4.3.1: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico pH em água da região Norte.....	94
Tabela 4.3.2: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico P (mg.kg ⁻¹) da região Norte.....	95
Tabela 4.3.3: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico C (g/kg) da região Norte.....	96
Tabela 4.3.4: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico K ⁺ (cmol _c /kg ⁻¹) da região Norte.....	97
Tabela 4.3.5: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico CTC da região Norte.....	98
Tabela 4.3.6: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico Al(m) da região Norte.....	99
Tabela 4.3.7: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico V% da região Norte.....	100
Tabela 4.3.8: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico pH em água da região Noroeste.....	102
Tabela 4.3.9: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico P (mg.kg ⁻¹) da região Noroeste.....	103
Tabela 4.3.10: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos em algumas do atributo químico C (g/kg) da região Noroeste.....	104

Tabela 4.3.11: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico K^+ (cmol_c/kg) da região Noroeste.....	105
Tabela 4.3.12: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico CTC ($\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) da região Noroeste.....	106
Tabela 4.3.13: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos em algumas do atributo químico Al(m)% da região Noroeste.....	107
Tabela 4.3.14: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico V% da região Noroeste.....	108
Tabela 4.2.15: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável pH em água da região Serrana.....	110
Tabela 4.2.16: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável P ($\text{mg}.\text{kg}^{-1}$) da região Serrana.....	111
Tabela 4.2.17: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável C (g/kg) da região Serrana.....	112
Tabela 4.2.18: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável K^+ (cmol_c/kg) da região Serrana.....	113
Tabela 4.2.19: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável CTC ($\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) da região Serrana.....	114
Tabela 4.2.20: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável Al(m)% da região Serrana.....	115
Tabela 4.2.21: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável V% da região Serrana.....	116
Tabela 4.3.1.1: Resumo das variáveis explicativas dos modelos de RLM.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1: Mapa esquemático e generalizado dos principais solos da região Sudeste.....	28
Figura 2.1.2: Crescimento das plantas em função da concentração do micronutriente nos tecidos.....	33
Figura 2.1.3: Relação entre o pH do solo e a disponibilidade de diversos nutrientes.....	36
Fig.: 2.2.1. Um exemplo esquemático de regressão-krigagem: distribuição de uma variável ambiental.....	46
Figura 2.2.2: Parâmetros do semivariograma.....	48
Figura 2.2.3: Modelos do semivariograma.....	49
Figura 3.1.1: Solos da região Norte do Estado do Rio de Janeiro.....	52
Figura 3.1.2: Tipos de solo representados em porcentagem na região Norte.....	53
Figura 3.1.3: Solos da região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.....	55
Figura 3.1.4: Tipos de solo representados em porcentagem na região Noroeste.....	56
Figura 3.1.5: Solos da região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro.....	58
Figura 3.1.6: Tipos de solo representados em porcentagem na região Noroeste.....	58
Figura 3.2.1. Mapa de municípios das regiões Norte, Noroeste e Serrana do Rio de Janeiro.....	61
Figura 3.2.2: Área de Estudo (Regiões Norte, Noroeste e Serrana) com a localização dos pontos amostrados.....	62
Figura 3.2.3: Fluxograma das etapas da pesquisa.....	63
Figura 3.2.4: Exemplo do banco de dados das variáveis químicas de fertilidade mais dados de variáveis ambientais nos pontos amostrais.....	64
Figura 3.2.5: Exemplo do banco de dados das variáveis ambientais para toda a região.....	64
Figura 4.1.1: Box-Plot região Norte, na camada de 0-10cm. Antes (4.1.1a) e após (4.1.1b) a retirada de valores extremos.....	74
Figura: 4.1.2a: Região Norte: histogramas e correlações de Pearson antes da retirada de valores discrepantes apresentando a distribuição de valores no conjunto de dados.....	75

Figura: 4.1.2b: Região Norte: Histogramas de correlação de Pearson após a retirada de valores extremos mostrando a distribuição do conjunto do banco de dados de fertilidade mais próximo da normal.....	75
Figura 4.1.3: Box-Plot região Noroeste, na camada de 0-10cm. Antes (4.1.3a) e após (4.1.3b) a retirada de valores extremos.....	78
Figura: 4.1.4a: Região Noroeste: histogramas e correlação de Pearson antes a retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.....	80
Figura: 4.1.4b: Região Noroeste: histogramas e correlação de Pearson após a retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.....	80
Figura 4.1.5: Box-Plot região Serrana, na camada de 0-10cm. Antes (4.1.5a) e após (4.1.5b) a retirada de valores extremos.....	83
Figura: 4.1.6a: Região Serrana: histogramas e correlações de Pearson antes da retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.....	85
Figura: 4.1.6b: Região Serrana: histogramas e correlações de Pearson após a retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.....	85
Figura 4.2.1: Correlação das variáveis de fertilidade e ambientais (sem valores extremos) da região Norte.....	88
Figura 4.2.2: Correlação das variáveis de fertilidade e ambientais (sem valores extremos) da região Noroeste.....	90
Figura 4.2.3: Correlação das variáveis de fertilidade e ambientais (sem valores extremos) da região Serrana.....	92
Figura 4.4.1: Mapa (Regressão + Krigagem) pH em água Regiões Norte, Noroeste e Serrana(A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B).....	123
Figura 4.4.2: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável pH em água.....	124
Figura 4.4.3: Mapa (Regressão + Krigagem) Potássio (K^+) Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B).....	128
Figura 4.4.4: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Potássio.....	129
Figura 4.4.5: Mapa (Regressão + Krigagem) Fósforo Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B).....	133

Figura 4.4.6: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Fósforo.....	134
Figura 4.4.7: Mapa (Regressão + Krigagem) Carbono Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B).....	137
Figura 4.4.8: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Carbono.....	138
Figura 4.4.9: Mapa (Regressão + Krigagem) CTC Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B).....	142
Figura 4.4.10: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável CTC.....	143
Figura 4.4.11: Mapa (Regressão + Krigagem) V% Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B).....	147
Figura 4.4.12: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável V%.....	148
Figura 4.4.13: Mapa (Regressão + Krigagem) Al(m)% Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B).....	151
Figura 4.4.14: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Al(m)%.....	152

LISTA DE ABREVIATURAS

- AIC** - Critério de Informação de Akaike
- Al(m)%** - Saturação por Alumínio
- ATP** - Adenosina Tri-Fosfato
- C(g/kg)** – Carbono Orgânico
- CIDE** – Centro de Informações de Dados do Rio de Janeiro
- CPRM** – Centro de Pesquisas e Recursos Minerais
- CTC (cmol_c/kg)** – Capacidade de Troca Catiônica
- DNA** - Ácido Desoxirribonucleico
- EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
- K⁺(cmol_c/kg)** – Potássio Trocável
- FAO** - Organização para a Alimentação e Agricultura
- IAC** - Instituto Agrônomo de Campinas
- IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IFPRI** – Instituto Internacional de Pesquisa em Política Alimentar
- INPE** – Instituto de Pesquisas Espaciais
- IPCC** - Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima
- MDE** – Modelo Digital de Elevação
- NDVI** - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
- P(mg.kg⁻¹)** – Fósforo Assimilável
- PIB** – Produto Interno Bruto
- RLM** - Regressão Linear Múltipla
- RK** – Regressão - Krigagem
- RMSE** – Raiz Quadrada do Erro Médio
- SIG** – Sistema de Informação Geográfica
- UNEP** - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
- V%** - Saturação por Base

Sumário

Introdução	19
Objetivos:	21
Justificativa:	21
2_Embasamento teórico	23
2.1_ A fertilidade do solo	23
2.1.1 - <i>Importância atual da fertilidade dos Solos</i>	23
2.1.2- <i>Fertilidade dos solos brasileiros</i>	25
2.1.2a <i>Produção Agrícola do Brasil (2008/2009)</i>	30
2.1.3 - <i>As variáveis químicas indicadoras de fertilidade</i>	32
2.2 _ Pedologia quantitativa.....	38
2.2.1- <i>Os fatores de formação do solo (variáveis ambientais): Jenny (1941) e o modelo SCORPAN</i>	38
<i>Variáveis Ambientais</i>	40
2.2.2- <i>Predição e mapeamento digital</i>	42
3 _ Materiais e Métodos	50
3.1 – Área de Estudo	50
3.1.1 – <i>Aspectos físicos</i> :.....	51
3.2 – Etapas da Pesquisa	59
3.2.1 _ <i>Análise exploratória e identificação de valores extremos</i>	65
3.2.2_ <i>Regressão Linear Múltipla (Regressão – Krigagem)</i>	65
3.2.3_ <i>Mapeamento digital das variáveis indicadoras da fertilidade natural</i>	68
4. Resultados e Discussão.....	71
4.1- <i>Análise descritiva e exploratória das variáveis químicas indicadoras de fertilidade natural dos solos</i>	71
4.2 – <i>Relações entre variáveis de fertilidade natural e variáveis ambientais</i>	86
4.3 – <i>Predição e modelagem de atributos da fertilidade dos solos por Regressão Linear Múltipla</i> ...	93
<i>Região Norte</i>	93
<i>Região Noroeste</i>	101

<i>Região Serrana</i>	109
4.3.1 _ <i>Resumo da análise de Regressão Linear Múltipla (RLM) nas regiões Norte, Noroeste e Serrana</i>	116
4.4 _ Mapeamento Digital da Fertilidade Natural do Solo.....	120
5_ Conclusões.....	154
6_ Referência Bibliográfica.....	157

Introdução

Ao longo das últimas décadas, as atividades agropecuárias e de silvicultura cumpriram com eficiência seu papel na economia brasileira: supriram alimentos, energia, fibra e outros produtos à população, geraram divisas, via exportação de excedentes e de capital, forneceram matéria prima para a industrialização do país. Essa evolução foi devida, em grande parte, aos conhecimentos técnicos gerados pela pesquisa agropecuária sobre os solos tropicais relacionadas às necessidades de correção de suas deficiências nutricionais.

A fertilização é um dos principais condicionantes da produtividade dos solos, sendo simultaneamente apontada como a principal responsável pelo impacto da atividade agrícola sobre a qualidade do ambiente. A fertilidade do solo quando deficiente, de forma quantitativa ou qualitativa, prejudica o potencial genético das plantas (Foth, 1990).

A variabilidade espacial e temporal dos nutrientes dos solos pode ser identificada e modelada através de métodos geoestatísticos ou de mapeamento digital de solos (McBratney et al., 2003). Essa variabilidade espacial das propriedades do solo é muito influenciada pela atividade humana. A introdução de tecnologias digitais, tais como o sensoriamento remoto, maior velocidade de processamento dos computadores, gerenciamento de dados espaciais, métodos quantitativos para descrever padrões e processos do solo proporcionaram novas oportunidades para prever propriedades e processos do solo. A história da cartografia digital e de modelagens do solo é marcada pela opção de novas técnicas e ferramentas para analisar, integrar e visualizar o conjunto de dados ambientais e do solo (Grunwald, 2006).

No Brasil, atualmente existem apenas levantamentos de solos antigos e pouco detalhados, como os do projeto RADAM (escala 1:1000.000) e os realizados pela Embrapa (Demmatê et al, 2004). O estado de São Paulo é o que apresenta mapas com melhor nível de detalhamento, tais como as cartas semi-detalhadas realizadas pelo IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) que, mesmo assim, não cobrem todo o estado. Estes levantamentos não contemplam todo o território nacional, mas foram importantíssimos para o estabelecimento de políticas em níveis regionais. Portanto, para todos os demais fins, tais como aptidão agrícola, a

que se possam destinar os levantamentos pedológicos e que os exigem em níveis de maior detalhe, pode-se dizer que o Brasil é um país carente (Oliveira, et al. 1992).

Considerando a grande área geográfica do Brasil, a organização dos dados do solo, das propriedades ambientais e das classes, a fim de alcançar os requisitos para o mapeamento digital de solos pode ser uma tarefa complicada, que pode envolver diferentes instituições governamentais (IBGE, CPRM, EMBRAPA) e privadas (Mendonça-Santos e Santos, 2006).

Assim, a continuidade na execução de levantamentos, em quaisquer níveis, depende principalmente de técnicas de mapeamento digital, que podem iniciar uma nova fase dos levantamentos de solos, através da utilização de novas ferramentas. Diversos autores têm reportado que as utilizações de informações obtidas através destas ferramentas podem prever atributos do solo assim como mapeá-los de maneira menos onerosa e mais rápida (Brown et al. 2006).

Da produção agrícola do Estado do Rio de Janeiro, 76% concentra-se na região norte, e 7,5% e 7% localiza-se nas regiões noroeste e serrana, respectivamente. Seis produtos agrícolas (cana-de-açúcar, tomate, banana, aipim, coco verde e chuchu) respondem por 88% da produção do estado e a cana representa 78% deles (CIDE, 2005). Assim, a antiga vocação agrícola do estado coincide com as demandas atuais do mercado de agroenergia, e se concentra, estrategicamente, nas regiões noroeste, norte, enquanto a região serrana diversifica a produção, com ênfase sobre as oleaginosas e a fruticultura. Justifica-se, portanto a escolha destas regiões para intensificar projetos sobre o uso racional de fertilizantes e corretivos, buscando novos insumos para a nossa agricultura, aplicados as novas tecnologias, para manter sua competitividade e a segurança alimentar do país. Esta é uma oportunidade de dar contribuição para a agricultura brasileira nos tempos atuais e futuros.

Objetivos:

Objetivo geral deste trabalho é gerar mapa de fertilidade natural do solo das Regiões Norte, Noroeste e Serrana do Estado do Rio de Janeiro, utilizando as técnicas de Mapeamento Digital de Solos.

Objetivos específicos são:

- Escolher as variáveis químicas indicadoras de fertilidade natural e as variáveis ambientais a serem utilizadas na modelagem solo-paisagem.
- Definir as condições de fertilidade natural, expurgando do banco de dados de fertilidade os valores considerados espúrios.
- Realizar a modelagem solo-paisagem de cada um das variáveis químicas de fertilidade do solo pH em água, P(mg.kg), K^+ (cmol_c/kg), C(g/kg), CTC(cmol_c/kg), V% e Al(m)% , usando como preditoras as variáveis ambientais (Plano de Curvatura, Perfil de Curvatura, Índice de Umidade, Aspecto, Declividade, Tipos de Solo, NDVI, Imagens Landsat 7 (bandas 2, 4 e 7) e Litologia).

Justificativa:

O Mapeamento Digital de Solos, que está se difundindo nas ciências do solo (Hengl, et al 2006; Lagacherie, 2008; Lagacherie e McBratney, 2007; McBratney et al. 2003, entre outros). Essa tecnologia pode gerar informações que permitem o acesso ao conhecimento dos recursos naturais disponíveis, de forma mais quantitativa, com a utilização de dados obtidos por satélites e de métodos matemáticos. Neste estudo será abordada a fertilidade do solo das três regiões (Norte, Noroeste e Serrana), consideradas as mais produtivas do estado do Rio de Janeiro. O mapeamento da fertilidade dos solos pode ser importante, por exemplo, em relação à crescente demanda de alimentos que tem sido atendida por expansão de terras para desenvolver e satisfazer as necessidades alimentares das futuras populações.

A escolha das três regiões do Estado do Rio de Janeiro também se justifica por o Estado do Rio de Janeiro ter alcançado, segundo calculados pelo IBGE, em parceria com os órgãos estaduais de estatística, dos quais faz parte a Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro, o montante de R\$ 296,8 bilhões, com taxa de crescimento de 3,6% em relação a 2006, sendo o segundo PIB do país, com participação de 11,2%. Dentre as regiões mais importantes está a região Norte Fluminense (12,4% em 2006 e 10,8% em 2007) e a região Serrana (3,4% em 2006 e 2007). Vale registrar que nas Regiões Norte Fluminense e Baixadas Litorâneas a atividade de extração de petróleo e gás assume grande destaque. Em relação ao desempenho municipal, a terceira maior participação no PIB em 2007 foi do município de Campos dos Goytacazes da região Norte do estado (IBGE, 2008).

2_Embasamento teórico

2.1_ A fertilidade do solo

2.1.1 - Importância atual da fertilidade dos Solos

O solo é o meio principal para o crescimento e desenvolvimentos das plantas. É uma camada de material biologicamente ativo, resultante de transformações complexas como intemperismo de rochas e minerais, ciclagem de nutrientes, produção e decomposição de biomassa. O interesse na qualidade do solo tem sido estimulado pelo aumento da consciência desse importante componente da biosfera terrestre, não só na produção de alimentos, mas também na manutenção de serviços ambientais tais como o fluxo e qualidade da água, a biodiversidade e o equilíbrio de gases atmosféricos. A qualidade do solo pode mudar ao longo do tempo, devido a acontecimentos naturais ou impactos antrópicos; e pode ser melhorada pela gestão e ordenamento do território, decisões que pesam sobre as múltiplas funções do solo. A qualidade do solo pode ser também prejudicada pelas decisões que se concentram apenas em uma única função, como a produtividade de culturas (Doran, 2002).

Quase 40% dos solos agrícolas do mundo estão seriamente degradados, o que poderia prejudicar a longo prazo a capacidade produtiva desses solos, de acordo com os cientistas do International Food Policy Research Institute (IFPRI). Os estudos realizados pelo IFPRI sugerem que a degradação do solo já promoveu impactos significativos sobre a produtividade agrícola de cerca de 16% das áreas agrícolas do planeta. Esses estudos mostram que quase 75% das terras agrícolas na América Central estão degradadas, 20% na África (principalmente em áreas de pastagens), e 11% da Ásia (Mackie, 2000).

A fertilidade do solo é crucial para a produtividade dos alimentos. No entanto, na maior parte do Sul da África, em algumas regiões da Austrália e do Brasil os solos são ácidos, forçando os agricultores a utilização de novas terras, após uma parcela tenha sido esgotada depois de alguns anos. Em regiões tropicais os solos ácidos ocorrem por intemperismo de nutrientes devido ao clima; em regiões temperadas, como Canadá, ocorrem por acidez da matéria orgânica. Práticas culturais tradicionais, como desmatar e queimar são simultaneamente uma causa e uma consequência da acidificação. A alta acidez do solo reduz, substancialmente,

o rendimento das culturas. Sem o uso de corretivos, para neutralizar a acidez, terras férteis podem se tornar estéreis, podendo levar à desertificação (UNEP, 2009; FAO, 2008).

A distribuição da utilização dos solos (plantações e pastagens) possui em muitos casos importância estratégica. As terras agrícolas no mundo são utilizadas de diferentes formas. Isso difere conforme os fatores climáticos e pedológicos e também está relacionado às questões culturais e sociais. A maioria das plantações como o arroz, o trigo, o milho e leguminosas, entre outras culturas, se espalharam para fora do Hemisfério Norte, na zona temperada, e no Sul e Leste da Ásia. Áreas dominantes na agricultura são América do Sul, uma parte da América do Norte e Austrália (UNEP, 2007).

Impactos das alterações climáticas incluem longos períodos de seca e perda de fertilidade do solo (Berndes e Börjesson, 2002). Se as plantações forem adequadamente localizadas, concebidas e geridas, podem reduzir a lixiviação dos nutrientes e a erosão do solo e gerar mais serviços ambientais, tais como, acúmulo de carbono, a melhoria da fertilidade do solo (Berndes et al, 2004).

Fatores ligados à geografia da região podem ser bastante significativos na vulnerabilidade ambiental. Estudo recente da Embrapa (2008) avaliou os impactos que o aquecimento global poderá causar às principais culturas agrícolas do país nas próximas décadas. Segundo o estudo, o aquecimento global pode provocar perdas nas safras de grãos de R\$7,4 bilhões já em 2020 – números que podem subir para R\$14 bilhões em 2070 – e alterar profundamente a geografia da produção agrícola no Brasil. No Brasil, áreas cultivadas com milho, arroz, feijão, algodão e girassol sofrerão forte redução na região Nordeste, com perda significativa da produção. Toda a área correspondente ao Agreste nordestino, hoje responsável pela maior parte da produção regional de milho, e a região do cerrado nordestino – sul do Maranhão, sul do Piauí e oeste da Bahia – serão as mais atingidas. Soja e café devem liderar as perdas. Foram consideradas as projeções de aumento de temperatura do quarto relatório de avaliação do IPCC (2009). Para realizar o estudo, os pesquisadores adotaram os cenários A2 - o mais pessimista, que estima um aumento de temperatura entre 2°C e 5,4°C até 2100 - e o B2 - um pouco mais otimista, que prevê um aumento de temperatura entre 1,4°C e 3,8°C em 2100. Análises econômicas preliminares mostram que as culturas analisadas, sem contar cana-de-açúcar e mandioca, devem sofrer um prejuízo anual de produção que poderá atingir R\$ 6,7 bilhões, em 2020, a R\$ 12,1 bilhões em 2070, isso no cenário B2. Já no cenário A2, o impacto

negativo anual deverá ser de R\$ 7,4 bilhões no ano de 2020, chegando a R\$ 14 bilhões em 2070. Por um lado, a agricultura também é uma das responsáveis pelo aquecimento global: as emissões do setor, somadas ao desmatamento para a conversão de terras agrícolas, representam entre 17% e 32% de todas as emissões de gases-estufa provocadas pelo ser humano no mundo. Por outro lado, a agricultura é igualmente uma das vítimas das mudanças climáticas (Embrapa, 2008).

A explosão populacional que vem ocorrendo nos últimos anos e a crescente demanda de recursos naturais se transformou em uma crise alimentar global que requer soluções bem complexas. Apesar do grande desenvolvimento da ciência, uma interação política e ética é fundamental para a superação deste desafio. A população mundial atual de 6,5 bilhões está distribuída de forma econômica e socialmente desigual e já vem sentindo os efeitos dessa desigualdade. A fome não é apenas ocasionada pelo crescimento populacional, mas, pela má distribuição de renda, desequilíbrio ecológico, diminuição de extensões de terras agricultáveis (pela degradação do solo ou ocupação urbana), fenômenos climáticos extremos, má administração política, entre outros fatores (FAO, 2009a).

A ciência do solo precisa desempenhar um papel crucial na junção das necessidades atuais e emergentes da sociedade dos próximos séculos. Além de aumentar a segurança alimentar através da diminuição da fome e da desnutrição, os recursos do solo devem ser pesquisados em relação às inúmeras necessidades globais. Estas necessidades incluem, além da agricultura, através de colaborações interdisciplinares com o objetivo de melhorar a qualidade dos recursos de água doce, minimizar a desertificação, responder as crescentes necessidades energéticas e desenvolver estratégias de desenvolvimento sustentável, bem como aliviar a pobreza das comunidades agrícolas como motor do desenvolvimento econômico e satisfazer as inspirações da urbanização e da industrialização (Lal, 2007).

2.1.2- Fertilidade dos solos brasileiros

O Brasil tem cerca de 50 milhões de hectares sob culturas anuais e permanentes, possuindo uma grande reserva de terras com potencial agrícola. É caracterizado pela diversidade de solos, resultante da interação dos diferentes tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos associados, os quais, por sua vez, condicionam diferentes

processos formadores de solos. Esta diversidade é refletida nas diferenças regionais (FAO, 2004, Embrapa, 2007).

Estas diferenças regionais apresentam consideráveis variabilidades na paisagem, refletem-se diretamente no potencial agrícola das terras e também na diversificação dos usos do solo. Com base no Mapa de Solos do Brasil (Embrapa, 1981), e no atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), podem-se distinguir 13 principais classes de solo, representativas das paisagens brasileiras (Tabela 2.1.1).

Tabela 2.1.1: Extensão e distribuição dos solos no Brasil e nas suas regiões.

Solos	Brasil		Relativa por Regiões				
	Absoluta (km ²)	Relativa ao Total (%)	Norte (%)	Noroeste (%)	Centro-Oeste (%)	Sudeste (%)	Sul (%)
Argissolos	1.713.854	19,98	24,40	17,20	13,77	20,68	14,77
Cambissolos	232.139	3,09	1,06	2,09	1,59	8,64	9,28
Chernossolos	42.364	0,53	0,00	1,05	0,27	0,21	3,94
Espodossolos	133.205	1,58	3,12	0,39	0,26	0,37	0,00
Gleissolos	311.445	3,66	6,41	0,78	2,85	0,50	0,40
Latossolos	3.317.590	39,73	33,86	31,01	52,81	56,30	24,96
Luvissolos	225.595	2,65	2,75	7,60	0,00	0,00	0,00
Neossolos	1.246.899	15,57	8,49	27,55	16,36	9,38	23,23
Nitossolos	119.731	1,41	0,28	0,05	1,22	2,56	11,48
Planossolos	155.152	1,84	0,16	6,61	1,73	0,16	3,00
Plintossolos	508.539	5,95	7,60	4,68	8,78	0,00	0,00
Vertissolos	169.015	2,01	3,20	0,99	0,36	1,20	2,60

Fonte: Embrapa, 1999.

No Nordeste, por exemplo, ocorrem solos de média a alta fertilidade natural, em geral, solos pouco profundos, em decorrência de seu baixo grau de intemperismo, classificados como Latossolos e Neossolos. O déficit de umidade, por vez associado à salinidade e/ou elevados níveis de sódio, é o principal fator limitante à produção agrícola no Nordeste. No Sertão, os principais solos que ocorrem são os Luvissolos e Argissolos Vermelhos Eutróficos, que se situam nas porções intermediárias do relevo. São pouco profundos, com somente 40 a 60 cm acima da rocha, relativamente ricos em nutrientes. Muitos destes solos apresentam sérias limitações para a agricultura, relacionadas com a pouca espessura do solo e o regime incerto e escasso de chuvas. As partes mais baixas e planas podem apresentar problemas de salinização (Prado, 2001).

A Região Centro-Oeste é uma vasta superfície aplainada pelos processos erosivos naturais, constituída pelo Planalto Central Brasileiro, onde predomina o clima tropical quente, com solos profundos, bem drenados, de baixa fertilidade natural, porém com características físicas favoráveis, além das condições topográficas que permitem a mecanização das lavouras.. Os Latossolos e alguns Neossolos são os mais comuns das superfícies quase planas das chapadas e nas áreas de relevo suavemente ondulado. Os Latossolos sob vegetação de cerrado são ácidos e pobres em nutrientes. Essa acidez, relacionada ao alumínio tóxico, e escassez de nutrientes são alguns dos principais fatores limitantes para a agricultura, mas com manejo adequado do solo e a adição de fertilizantes e calagem estes solos são propícios à agricultura intensiva (FAO, 2004; Prado, 2001).

Planaltos e áreas altiplanas, com vários picos superiores a 2000 metros, caracterizam a região Sudeste. Nesta região os solos são predominantemente os Latossolos e Argissolos, bem desenvolvidos e, geralmente de baixa fertilidade natural (FAO, 2004, Embrapa, 2007). Na região Sudeste, em ambientes mais úmidos, além da baixa fertilidade natural dos solos, é comum a ocorrência de solos pouco desenvolvidos, com quantidades consideráveis de minerais primários e com expressivas quantidades de gibbsita (Gomes, 1976; Embrapa, 1983). As áreas montanhosas, da região Sudeste, compreendem a maior parte dos Estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro e partes do leste de São Paulo e Minas Gerais. Nela está o domínio da Mata Atlântica, hoje em sua maior parte ocupada por campos e pastagens. Nas regiões conhecidas como “mar de morros”, predominam os Argissolos e Latossolos Vermelho Amarelos, desenvolvidos principalmente em materiais derivados de granitos, gnaisses e xistos. A maior limitação para a agricultura em Argissolos dessa região é a topografia montanhosa, que dificulta o uso de máquinas e favorece a erosão (Prado, 2001). A figura 2.1.1, mostra a localização dos principais solos da região Sudeste.

Na Região Sul, os solos são originados de rochas básicas e diversos sedimentos, e encontram-se distribuídos em uma paisagem com relevo diversificado, onde predomina o clima subtropical, com estações bem definidas, e solos férteis com elevado potencial agrossilvepastoril. Os solos são classificados como Latossolos, Neossolos, Argissolos e Nitossolos. As terras roxas de alta fertilidade, comuns no oeste do estado do Paraná, antes classificadas como Terra Roxa Estruturada, são classificadas, segundo a nova taxonomia brasileira, como Nitossolos Vermelhos Eutróficos. Estes solos já foram ocupados com o cultivo

de café, mas recentemente estão sendo utilizados para os cultivos anuais de soja, milho, trigo, entre outros (FAO, 2004; Embrapa, 2007).

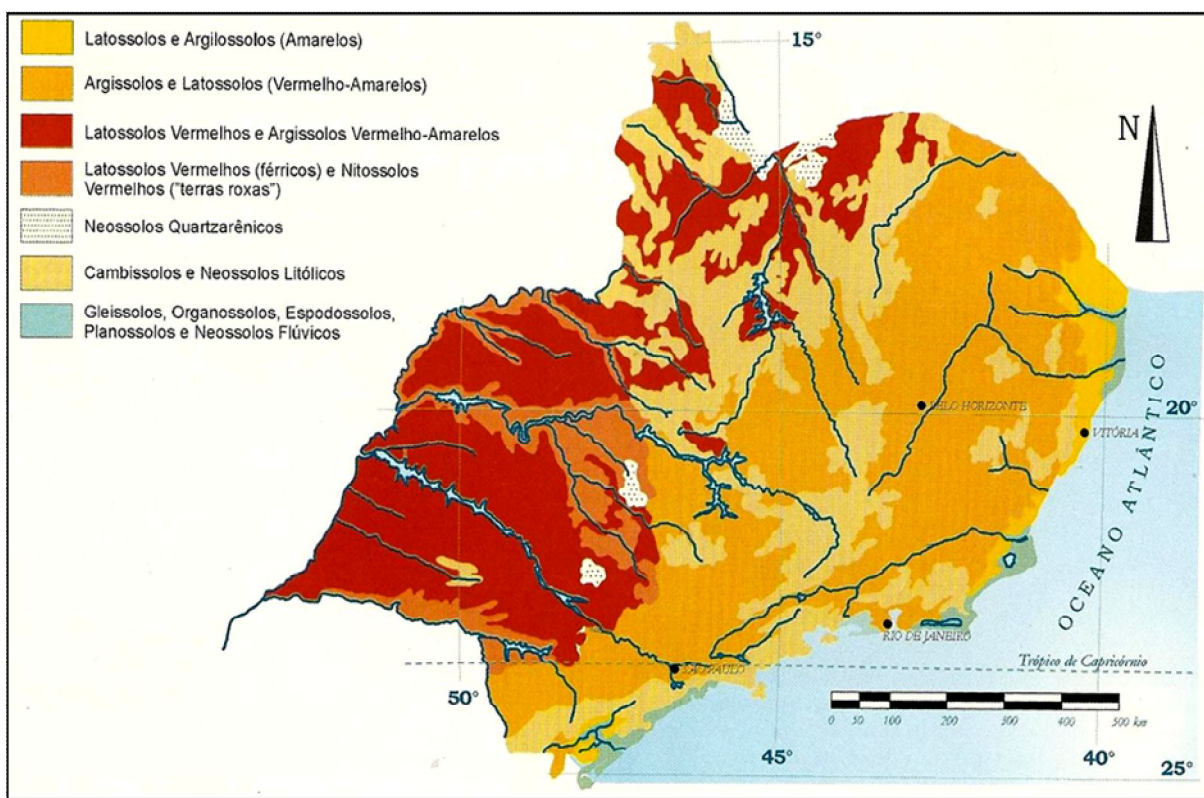


Figura 2.1.1: Mapa esquemático e generalizado dos principais solos da região Sudeste. (Adaptado de EMBRAPA, 1981 e IBGE, 2001 apud. Lepsch, 2002 p.140).

A Tabela 2.1.2 apresenta a aptidão agrícola das terras do Brasil por regiões, evidenciando os diferentes níveis tecnológicos de manejo (primitivo, intermediário e avançado). Analisando esta tabela, verifica-se que existe uma grande predominância de terras aptas para lavouras, quando comparadas às demais atividades. Considerando-se os diferentes níveis tecnológicos, o país dispõe de aproximadamente 60% do seu território com terras aptas ao uso agropecuário. Ao analisar a atividade de lavoura no conjunto de todas as regiões do Brasil, observa-se que os níveis de manejo, ou seja, os graus de intensidade de uso de tecnologias no manejo do solo englobam-se na definição do maior ou menor potencial de terras aptas para a agricultura. Observando a Tabela 2.1.2 fica evidente que, para o manejo A (primitivo), existe um predomínio de terras com sérias limitações (classe restrita) para todas as regiões do país, significando que a utilização de tecnologias rudimentares limita, grandemente, o cultivo de lavouras. No manejo B (pouco desenvolvido), verifica-se certo equilíbrio entre as

terras com limitações moderadas e fortes (classes regular e restrita) na maioria das regiões brasileiras. Enquanto no manejo C (desenvolvido; altamente tecnológico) ocorre um forte predomínio de terras com moderadas restrições, considerando-se o atual nível de tecnologia. Torna-se interessante destacar que as terras mais férteis e propícias à agricultura (classe Boa) só ficaram mais evidenciadas nos manejos B e C, mesmo assim predominantemente nas regiões Sudeste e Sul (Geo Brasil, 2002).

Tabela 2.1.2: Aptidão das terras do Brasil por região e por nível de manejo para os diferentes tipos de usos indicados. (Fonte: Ramalho Filho e Pereira, 1999)

Tipo de Utilização	Região	Classe de Aptidão por nível de Manejo (km ²)								
		Nível de Manejo A			Nível de Manejo B			Nível de Manejo C		
		Boa	Regular	Restrita	Boa	Regular	Restrita	Boa	Regular	Restrita
Lavouras	Norte	25.850	204.982	2.046.873	106.878	1.751.585	427.377	30.032	1.731.001	326.120
	Nordeste	13.394	145.079	435.307	15.555	421.060	321.150	7.482	436.452	267.025
	Sudeste	22.715	118.648	147.506	102.929	130.785	330.767	78.230	266.287	45.966
	Centro-Oeste	2.508	68.048	358.065	10.708	385.902	579.222	107.426	636.919	231.460
	Sul	46.191	96.824	142.717	64.975	171.474	162.399	38.388	233.857	48.078
	Total	110.658	633.581	3.130.468	301.045	2.860.806	1.820.915	261.558	3.304.516	918.649
Pastagem Plantada¹	Norte	-	-	-	-	234.113	4.935	-	-	-
	Nordeste	-	-	-	4.908	91.636	27.967	-	-	-
	Sudeste	-	-	-	2.957	40.215	96.807	-	-	-
	Centro-Oeste	-	-	-	-	339.309	22.119	-	-	-
	Sul	-	-	-	34.125	16.836	10.210	-	-	-
	Total	-	-	-	41.990	722.109	162.038	-	-	-
Silvicultura²	Norte	-	-	-	-	-	3.816	-	-	-
	Nordeste	-	-	-	1.939	33.908	71.854	-	-	-
	Sudeste	-	-	-	-	58.619	9.415	-	-	-
	Centro-Oeste	-	-	-	-	139.418	71.006	-	-	-
	Sul	-	-	-	3.127	7.322	11.238	-	-	-
	Total	-	-	-	5.066	239.267	167.329	-	-	-
Pastagem natural³	Norte	-	-	9.469	-	-	-	-	-	-
	Nordeste	287	141.564	290.781	-	-	-	-	-	-
	Sudeste	-	945	77.084	-	-	-	-	-	-
	Centro-Oeste	-	-	209.181	-	-	-	-	-	-
	Sul	19.789	10.359	3.102	-	-	-	-	-	-
	Total	20.076	152.868	589.617	-	-	-	-	-	-

(1) Terras com aptidão exclusiva para pastagens plantadas; não aptas para lavouras.

(2) Terras com aptidão exclusiva para silvicultura; não aptas para lavouras e pastagens plantadas.

(3) Terras com ocorrência exclusiva de pastagem natural e não indicadas para outras formas de uso.

2.1.2a Produção Agrícola do Brasil (2008/2009)

De acordo com os dados do IBGE (2009), a safra de cereais, leguminosas e oleaginosas de 2009 indica que esta foi a segunda maior safra nacional de grãos no Brasil, com uma produção de 134 milhões de toneladas, 8,3% inferior à safra recorde de 2008 (146 milhões de toneladas). Entre as Grandes Regiões, esse volume da produção de cereais, leguminosas e oleaginosas obtido em 2009, apresenta a seguinte distribuição e variação, comparativamente ao ano anterior: Região Sul, 52,4 milhões de toneladas (-14,6%); Centro Oeste, 48,8 milhões de toneladas (-3,9%); Sudeste, 17,2 milhões de toneladas (-2,4%); Nordeste, 11,6 milhões de toneladas (-6,7 %) e Norte, 3,8 milhões de toneladas (-0,1%). O estado do Mato Grosso, em 2009, lidera como maior produtor nacional de grãos, superando em 2,9 pontos percentuais, a safra paranaense, já que o Paraná foi muito afetado pelas más condições climáticas, como seca, no início do ano, geadas em junho e chuvas excessivas neste período final de ciclo das culturas de inverno (IBGE, 2009)

A produção brasileira de hortaliças elevou-se de 9 milhões de toneladas, em uma área de 700 mil hectares, em 1980, para 17,5 milhões de toneladas, em 771,4 mil hectares, em 2006, segundo números da Embrapa. O explosivo aumento da produção de soja, de quase 30 vezes no transcorrer de apenas três décadas, determinou uma cadeia de mudanças sem precedentes na economia do Brasil. Esse crescimento se deveu não apenas ao aumento da área plantada (de 1,3 milhão para 8,8 milhões de hectares, entre a década de 1970 e os anos 2000), mas também ao expressivo incremento da produtividade (1,14 t/ha para 1,73 t/ha), por conta das novas tecnologias disponibilizadas aos produtores pela pesquisa brasileira (Embrapa, 2008).

O IBGE realizou, em dezembro, o terceiro prognóstico de área e produção para a safra de 2010, nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste e nos estados de Rondônia, Maranhão, Piauí e Bahia. Neste terceiro prognóstico, a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas para 2010, é estimada em 141 milhões de toneladas, 5,2% maior que a obtida em 2009, enquanto que a área a ser colhida, de 48,1 milhões de hectares, também deverá crescer 2,0%. Com relação às produções esperadas para 2010, apresentam variações positivas os seguintes produtos: batata-inglesa (1,0%), café em grão (15,2%), cebola (10,5%), feijão em grão (17,9%), fumo em folha (3,9%), mandioca

(2,9%) e soja em grão (14,4%). Os seguintes produtos apresentaram variações negativas: algodão herbáceo em caroço (1,1%), amendoim em casca (10,6%), arroz em casca (5,0%) e milho em grão (3,2%). No caso do arroz, nesta terceira avaliação nacional para 2010, a produção esperada de 12,0 milhões de toneladas é inferior 5,0% à obtida em 2009. Conforme relatado nas avaliações anteriores, este decréscimo se deve, principalmente, ao Rio Grande do Sul, principal produtor, com 60,7% de participação na produção nacional, que registrou uma retração de 8,1% na produção esperada e de 2,9% na área. Essa diminuição na produção ocorre em função do excesso de chuvas que causou o encharcamento de algumas áreas, além de uma menor incidência de luz, que, em conjunto, resultaram numa estimativa de queda no rendimento médio de 5,4%, em relação a 2009 (IBGE, 2009).

- Produção Agrícola do Rio de Janeiro

A agricultura no Rio de Janeiro iniciou-se no século XVI com a produção da cana-de-açúcar nas baixadas da Guanabara, Paraty e Campos dos Goytacazes. O Rio de Janeiro, capital do Reino, foi até a metade do século XIX, a região economicamente mais forte do país. Mesmo nessa época, quando São Paulo começou a desenvolver-se com a expansão da cafeicultura, o Rio de Janeiro acompanhou esse desenvolvimento, principalmente no Vale do Paraíba, onde foram feitas melhorias com a implementação de uma infra-estrutura que até então não existia. Quando a cafeicultura se deslocou para São Paulo por limitações de espaço geográfico e da acidentada topografia da região para onde poderia se expandir, o Rio de Janeiro deixou de concentrar a comercialização e a exportação da produção cafeeira. Nas primeiras décadas do século XX, a agricultura fluminense não se integrou ao movimento da “modernização agrícola” e entrou novamente em declínio: passou a ter pouca expressão na economia e a apresentar, entre os estados do Sudeste, as taxas mais baixas de produtividade no setor agropecuário (Fausto, 1995).

A estrutura fundiária do estado do Rio de Janeiro sofreu a influência do processo de imigração e colonização européia no século XIX, garantindo um espaço significativo para as pequenas propriedades, de caráter familiar. Esta ajudou no estabelecimento de lavouras voltadas predominantemente ao mercado interno crescente da população da região metropolitana do Rio de Janeiro. Em municípios como os de Nova Friburgo e

Teresópolis, surgiu um novo perfil de agricultores, apelidados de "novos rurais". Estes, muitas vezes detendo uma formação universitária e provenientes de famílias de posse, foram responsáveis por disseminar nessas regiões um novo modo de pensar o meio rural, caracterizado pela preocupação com o mercado consumidor (qualidade sanitária e biológica dos alimentos, embalagens, mercados especializados) e pela introdução de um novo modelo de agricultura: a Agroecologia. As regiões Serrana e Metropolitana do Estado, locais de maior concentração da produção de hortaliças e que congregam a maioria dos produtores credenciados na produção orgânica, comercializam de cerca de 390t de alimentos orgânicos *in natura* por ano no Estado (Fonseca e Campos, 1999).

No ano de 2008, a área total dos estabelecimentos agropecuários teve um acréscimo superior a 8%. Desta área, 23% são utilizadas para lavoura, 61% para pastagem natural e 14% para matas e florestas (CIDE, 2008).

2.1.3 - As variáveis químicas indicadoras de fertilidade

Espécies vegetais possuem variações significativas na absorção de nutrientes. Estas variações também dependem de fatores como o clima, propriedades do solo e manejo das culturas (FAO, 2003). O desenvolvimento das plantas depende da existência de substrato para fixação das raízes, da quantidade adequada de luz, da disponibilidade de água e da disponibilidade de quantidades adequadas de nutrientes orgânicos e minerais. Por isso, o solo deve prover um ambiente no qual as raízes possam desenvolver-se, o que requer espaço poroso, oxigênio e ausência de elementos tóxicos (Meurer, 2006).

Arnon e Stout (1939) apud. Fernandes (2006) estabeleceram três critérios de essencialidade para um elemento; são eles:

- Um elemento é essencial se sua deficiência impede que a planta complete o seu ciclo de vida;
- O elemento não pode ser substituído por outro com propriedades similares; e
- O elemento deve participar diretamente no metabolismo da planta e seu benefício não deve estar somente relacionado ao fato de melhorar as características do solo.

São essenciais dezesseis elementos químicos, onde cada um possui uma ou mais funções especiais no crescimento e desenvolvimento das plantas. Estes elementos essenciais devem estar presentes de forma utilizável e em concentração ótima, para

assegurar o crescimento das plantas. Além disso, deve haver um equilíbrio apropriado entre as concentrações dos vários nutrientes solúveis do solo. Os elementos essenciais podem ser classificados da seguinte forma: (1) macronutrientes são necessários em quantidades relativamente grandes, como: carbono, hidrogênio e oxigênio, que são oferecidos através do ar e da água, e nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, que provêm do solo. (2) Os micronutrientes são necessários em quantidades relativamente pequenas, como: ferro, manganês, zinco, cobre, boro, molibdênio, cloro. Por definição, todos os nutrientes são igualmente essenciais (Fageria, 1989; Meurer, 2006). Mas a acumulação de micronutrientes nos tecidos fora da concentração adequada pode levar à toxidez na planta e assim prejudicar o seu desenvolvimento (Figura 2.1.2) (Stevenson, 1986).

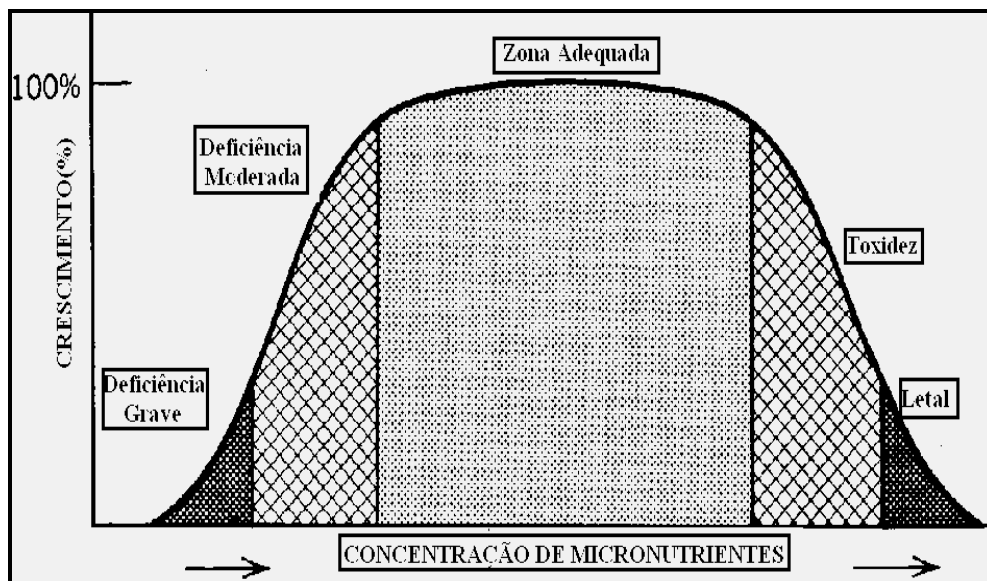


Figura 2.1.2: Crescimento das plantas em função da concentração do micronutriente nos tecidos. Fonte: (Stevenson, 1986).

Funções de alguns Nutrientes Orgânicos e Minerais

Existem muitos nutrientes importantes no desenvolvimento das plantas: o fósforo, por exemplo, sofre influência na sua distribuição por processos biológicos, a maioria das plantas assimila o fósforo disponível a partir de matéria orgânica existente no solo (Fernandes, 2006).

O carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H) são, em geral, incorporados às plantas pelo processo de fotossíntese, a partir do CO₂ atmosférico e da água presente no

solo. Como consequência da fotossíntese, esses três nutrientes fazem parte de praticamente todas as moléculas orgânicas dos vegetais e são responsáveis por cerca de 94-97% do peso seco de uma planta. Os demais nutrientes (6-3 % restantes) fazem parte dos minerais presentes no solo. Por derivarem dos minerais, esses elementos são denominados nutrientes minerais e o processo pelo qual as plantas os adquirem é denominado nutrição mineral (Perez, 2007).

A manutenção da matéria orgânica é requisito essencial para que o solo desempenhe suas funções. Embora o manejo e o clima exerçam forte influência sobre a dinâmica do carbono do solo, mudanças decorrentes da variabilidade espacial de atributos (físicos, químicos, biológicos ou pedogenéticos) são citadas como responsáveis por determinados padrões. O reconhecimento dessas mudanças, em escala local, pode auxiliar o entendimento dos processos que comandam a dinâmica de crescimento de florestas e do estoque de carbono do solo. O carbono forma a estrutura das biomoléculas das plantas, incluindo amido e celulose. É fixado através da fotossíntese e faz parte de carboidratos, que armazenam energia nos vegetais, é o componente de lípidios, proteínas, pigmentos, hormônios e ácidos nucleicos. Valores considerados baixo de carbono podem afetar a produtividade agrícola em razão de seu efeito na estrutura; na disponibilidade de água para as plantas, e no seu poder de tamponamento frente à presença de compostos muitas vezes tóxicos às plantas. O carbono orgânico ativo ou carbono da biomassa representa de 10 a 20% do teor de carbono orgânico total (Pinheiro et al., 2004).

O fósforo (P) no solo ocorre em duas formas: a orgânica e a inorgânica. O fósforo orgânico geralmente aumenta com o conteúdo da matéria orgânica (Coelho, 1973). A maior parte do P inorgânico ocorre na fração argila do solo. Encontra-se ligado ao cálcio, ferro e alumínio, na sua quase totalidade não assimilável pelas plantas. A apatita é a fonte de aproximadamente 95% do fósforo inorgânico no solo (Raij, 1991). O fósforo é absorvido pelas plantas, preferencialmente, na forma do ânion $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ e, em menor taxa, na forma do anion HPO_4^{-2} . É rapidamente translocado dentro das plantas e pode mover-se dos tecidos mais velhos para os mais novos, sob condições de reduzida disponibilidade no solo (Malavolta, 1980). Os primeiros compostos orgânicos formados de fósforo dentro da planta são as fosfohexoses e o difosfato de uridina, que são os precursores do ATP (adenosina tri-fosfato). A ATP é um nucleotídeo responsável pelo armazenamento de energia em suas ligações químicas, que está relacionado à maioria dos processos bioquímicos das plantas e lhes permite extrair nutrientes, a partir

do solo. Também desempenha um papel importante no desenvolvimento de células e na formação do DNA (Raij, 1991). O fósforo é essencial para o crescimento das plantas e é vital para o crescimento inicial. Este elemento desempenha um papel importante na fotossíntese, respiração, armazenamento de energia e transferência, divisão celular e vários outros processos na planta. Ele promove formação da raiz e melhora a qualidade de muitas frutas, legumes e culturas de cereais. O fósforo é essencial para a formação das sementes e seu conteúdo é maior nas sementes do que em qualquer outra parte da planta. Ele ajuda as raízes e mudas a desenvolver mais e rapidamente e ajuda na sobrevivência das plantas no período do inverno. O fósforo acelera a maturidade e contribui para a resistência à doença em algumas plantas (Fernandes, 2006; Malavolta, 1989).

A fonte natural do potássio é o intemperismo dos minerais feldspatos, micas e outros, assim como dos minerais de argila (Raij, 1991). Ocorre em maior concentração nos arenitos e calcários, variando no solo de acordo com o material do qual se originou (Mello et al., 1989). O Potássio é absorvido pelas raízes em forma iônica, K^+ , sendo o processo essencialmente ativo e servindo a solução do solo como fonte de nutriente (Malavolta, 1980). Essa forma está em equilíbrio com outra conhecida como trocável, que fica adsorvida aos colóides (orgânicos e minerais), devido à capacidade de troca catiônica desses materiais. Essas duas formas são consideradas disponíveis para as plantas, ou seja, são sujeitas à absorção (Tanaka et al., 1993). A absorção do potássio é estimulada na presença de Ca^{+2} no meio, embora o excesso deste último tenha efeito inibidor, como acontece, por exemplo, quando se usa um excesso de calcário na neutralização da acidez (Malavolta et al., 1997). Segundo Malavolta (1980), o potássio absorvido pelas raízes é conduzido à parte aérea pelo xilema e também pelo floema, e o elemento se dirige das folhas mais velhas para as folhas mais novas e para as regiões de crescimento. Quando há deficiência de potássio, a fotossíntese diminui, portanto, aumenta a taxa de respiração da planta, o fornecimento de carboidratos é reduzido. Potássio é essencial para a síntese protéica. Esse elemento possui um papel importante no funcionamento estomático e ajuda a planta a fazer um uso mais eficiente da água. É importante na formação dos frutos, em translocação de metais como o ferro, e no balanço iônico. Ele também aumenta a resistência à doença em plantas (Fernandes, 2006).

Propriedades Químicas Importantes no Solo

Os solos possuem várias propriedades químicas importantes, relacionadas, entre outras, ao pH, à CTC (Capacidade de Troca Catiônica) e ao teor de Al^{+3} e de matéria orgânica. O pH do solo influencia a solubilidade dos nutrientes e conseqüentemente a disponibilidade dos mesmos para as plantas. Em pH igual a 7,0 todos os macronutrientes estão disponíveis para as plantas, mas o zinco, o cobre, o manganês e o ferro são insolúveis em pH acima de 7,0 (Figura 2.1.3). Isto mostra a grande influência do pH na disponibilidade dos nutrientes no solo. O ideal é chegar-se a um valor intermediário (neutro) de pH, onde todos os nutrientes estejam disponíveis. A escala de pH varia de 0 a 14, sendo que em solos podem ser encontrados valores de 3 a 10, com variações mais comuns em solos brasileiros entre 4,0 a 7,5 (Lopes,1998).

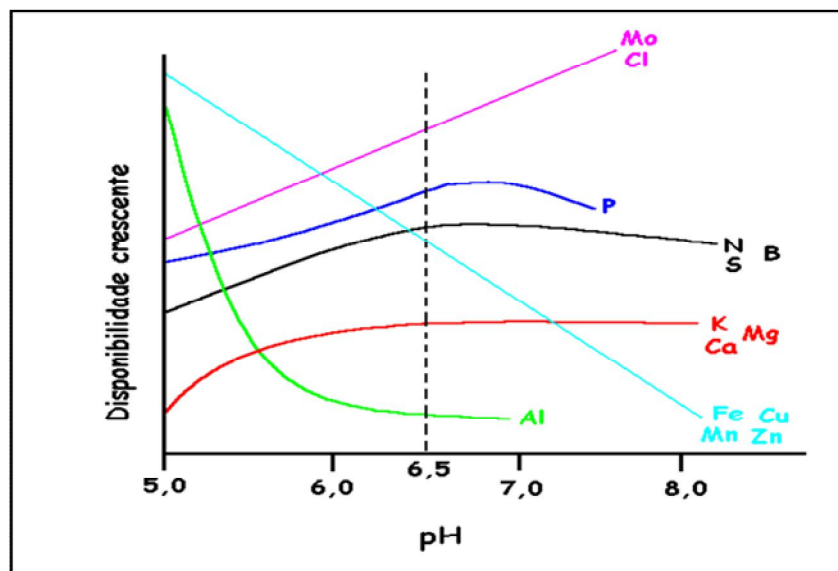


Figura 2.1.3: Relação entre o pH do solo e a disponibilidade de diversos nutrientes.
Fonte: Malavolta et al. (1989).

A CTC é um parâmetro que mede o nível de cargas negativas do solo, ou seja, as cargas que irão trocar cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+} , H^+) com a solução de solo, a qual é absorvida pelas raízes. Solos com pequenas partículas (argila) tendem a ter alta CTC, pois terão uma alta relação superfície/volume. Este parâmetro é de grande importância na agricultura, pois, expressa que o solo retém cátions como cálcio, magnésio, potássio, e outros em menores quantidades, mantendo-os em condições de disponibilidade para os vegetais. Um solo com alta CTC geralmente tem uma grande reserva de nutrientes minerais. Matematicamente, a CTC equivale à expressão (Raij, 1983; Perez, 2007):

$$CTC = S + Al^{3+} + H^+, \text{ onde } S \text{ (soma de bases)} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+$$

Quanto maior for o valor de S e menores forem os níveis de $Al^{3+} + H^+$, mais fértil será o solo. Por isso, a fertilidade de um solo é também avaliada por sua saturação de bases (V%) (Lopes, 1998):

$$V\% = S/CTC * 100 \text{ (solo considerado fértil: } V > 50\%)$$

Como a CTC é função das cargas negativas do solo, quanto mais fontes de cargas negativas, maior será a CTC. As fontes de cargas negativas de um solo são as soluções coloidais de argila e de matéria orgânica. Quanto à presença de argilas, é importante considerar que alguns tipos de argila possuem maior CTC que outras (Perez, 2007). Por exemplo, os minerais de argila do tipo 2:1 caracterizam – se por elevada superfície específica, que no caso da montmorilonita pode chegar a $600m^2/g$ e apresentam superfícies internas que participam da troca de cátions, por estes fatores a CTC é maior neste tipo de argila (Raij, 1981).

Cerca de um terço dos solos tropicais (1,5 bilhões de hectares) possuem acidez suficientemente forte para mobilizar o alumínio trocável (Al^{3+}). Um solo com pH inferior a 5,5 geralmente apresenta este problema. A toxicidade de alumínio é mais acentuada nas regiões tropicais úmidas. Essa restrição é encontrada principalmente em solos classificados como Latossolos, Argissolos e Cambissolos e também está relacionada com a baixa reserva de nutrientes (Sanchez, 2003). Em solos ácidos, a toxidez por Al^{3+} é fator limitante ao crescimento e aprofundamento do sistema radicular, à disponibilidade de nutrientes e à atividade biológica, afetando tanto o estabelecimento como o desenvolvimento das culturas (Ernani, et al. 2000). Dentre os fatores químicos relacionados à acidez do solo, os mais estudados são relacionados a Al^{3+} e a Ca^{2+} . Os efeitos tóxicos relacionados a Al^{3+} podem ser divididos em dois: um indireto, afetando a absorção de nutrientes, principalmente o P e o Ca^{2+} , e outro direto, afetando a divisão celular e o crescimento do sistema radicular das plantas (Pavan et al., 1982; Kochian, 1995). O Al^{3+} compete com sítios de troca no complexo coloidal que se torna cada vez mais saturado em alumínio (Malavolta, 1980). A saturação em Al^{3+} avalia a toxidez por alumínio de forma mais eficaz, e é calculada por:

$$m = (Al^{3+} \times 100) / t$$

2.2 _ Pedologia quantitativa

A modelagem quantitativa dos solos tem sido proposta a fim de descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos na paisagem, objetivando melhorar o conhecimento da variabilidade espacial dos solos, da precisão e da qualidade da informação, através de diversas técnicas quantitativas, chamadas no conjunto, de Pedometria (“Pedometrics”). Pedometria é um neologismo que deriva de duas palavras gregas *pedos* (solo) e *metron* (medida) (Webster, 1984). Nesse sentido Pedometria é: “A aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para o estudo da distribuição e gênese dos solos.” (McBratney, 1994).

A pedometria reúne muitos campos científicos do conhecimento, desde a geoestatística até a microbiologia do solo (Hengl, 2003). O domínio da pedometria pode ser mais bem definido pela interdisciplinaridade, envolvendo ciência do solo, estatística, matemática aplicada à ciência da geoinformação. A pedometria esta relacionada à abordagem quantitativa, a qualidade da informação da variabilidade do solo, incerteza e confiabilidade (Burroughs et al. 1994). Avanços em teorias matemáticas (redes neurais, por exemplo) e métodos estatísticos, bem como, sistemas remotos de aquisição de dados e informática, têm possibilitado o crescimento de estudos envolvidos em pedometria (Bui, 2007).

2.2.1- Os fatores de formação do solo (variáveis ambientais): Jenny (1941) e o modelo SCORPAN

A publicação da obra intitulada: “Fatores de Formação do Solo” Jenny (1941) trouxe uma das questões mais interessante para os cientistas do solo. Jenny (1941) equacionou o solo como uma função de fatores de formação, sendo estes:

Cl- clima; os elementos do clima que exercem maior influência nos processos de pedogênese são: temperatura, precipitação, ventos, deficiência e excedentes hídricos;

O- organismos - bactérias, fungos, protozoários, nematóides (microfauna), cupins, minhocas, formigas (mesofauna), e tatus (macrofauna), cobertura vegetal e atividades antrópicas são alguns dos principais agentes pedogenéticos.

R- relevo - atua, também, de forma a limitar ou favorecer a penetração da água no perfil do solo. A variação do volume de água que percola pelo perfil afeta diretamente a

eficiência dos fenômenos de hidratação, hidrólise e dissolução que ocorrem durante a evolução do solo;

P- material de origem - refere-se ao material geológico a partir do qual o solo se desenvolve. Trata-se, portanto, da matéria-prima sobre a qual os demais fatores de formação e os processos biogeoquímicos atuarão originando uma determinada classe de solo; e

T- tempo – o estágio de desenvolvimento de um solo mostra estreita relação entre exposição do material de origem à ação dos processos pedogenéticos – intemperismo, lixiviação, transporte de partículas, adições e tempo decorrido.

Jenny (1941) considerou os fatores de formação como variáveis controladoras do desenvolvimento do solo de forma independente. Ele tentou estabelecer uma relação entre as propriedades do solo e os fatores de formação mais importantes, resultando na seguinte Equação :

Eq. 2.2.1

$$S = f(cl, o, r, p, t, \dots)$$

Em que **S** indica o solo resultante da interação dos fatores de formação; *f* (função das variáveis da equação); *cl* (clima); *o* (organismo); *r* (relevo); *p* (material parental); *t* (tempo).

Jenny (1980) redefiniu seus conceitos sobre os fatores de formação, passando a considerá-los como um grupo de variáveis que fazem parte de um sistema ecológico/natural, o ecossistema solo. De acordo com esse novo enfoque, a gênese de um solo implica em ganhos, perdas e transformações de energia e matéria ao longo de sua evolução. Os fatores que conduzem à formação de um solo passam, então, a ser compreendidos de forma integrada e interdependente, conceito que requer maiores esforços científicos no sentido de elucidar os processos envolvidos na pedogênese.

É notável, pelo exposto, que o solo, enquanto recurso integrante da paisagem, desenvolve-se a partir da atuação de forças físicas, químicas e biológicas sobre um determinado material de origem. Tal interação de forças conduz a uma diferenciação de classes de solo nos distintos compartimentos da paisagem. Estudos correlacionando a gênese e ocorrência de solos segundo sua posição na paisagem são recorrentes na literatura pedológica, como nos trabalhos de Demattê et al. (1996), Phillips et al (2001), entre outros.

A partir do conhecimento dos fatores de formação da equação de Jenny (1941; 1980), McBratney et al. (2003) formulou o modelo SCORPAN. O objetivo não foi explicar os processos de formação dos solos, mas descrever quantitativamente as relações empíricas entre o solo e os outros fatores ambientais, que são usados como funções espaciais de predição. Sete fatores foram considerados para prever as propriedades (S_p) e as classes de solo (S_c), de acordo com SCORPAN (McBratney, et al, 2003).

$$\text{Eq. 2.2.2 } S = f(\text{s.c.o.r.p.a.n.}),$$

Onde:

s - solos, outros atributos ou classes

c - clima

o - organismo, vegetação ou fauna ou atividade humana

r - relevo (topografia, atributos da paisagem)

p - material de origem, litologia

a - idade, fator tempo

n - espaço, posição espacial

O modelo **SCORPAN** pode ser representado como: $S_c = f(\text{s.c.o.r.p.a.n.})$ ou $S_a = f(\text{s.c.o.r.p.a.n.})$, onde S_c é o modelo que utiliza as classe de solos e S_a , seus atributos. O fator **s** representa as informações de solos provenientes de um mapa existente, de sensores remotos ou através do conhecimento de especialistas. Estão implícitas em “**n**” as coordenadas espaciais x, y (localização geográfica). Cada fator será representado por um conjunto de uma ou mais variáveis contínuas ou categóricas, por exemplo, **r** por elevação, declividade ou outro atributo derivado do Modelo Digital de Terreno. Os métodos para estimar **f**, assim para executar o **s.c.o.r.p.a.n.**, podem ser as regressões multilíneas, as árvores de decisão (Chambers e Hastie, 1992), as redes neurais (Key, et al. 1989), entre outros. Este modelo é especialmente importante para prever os recursos dos solos em locais onde a informação é limitada (McBratney, et al. 2003).

Variáveis Ambientais

As características do relevo estão diretamente relacionadas com os processos de formação do solo (Klingebiel *et al.* 1987). Estas podem ser divididas em atributos

primários ou secundários. Os primários são diretamente calculados a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) e incluem variáveis como: declividade, orientação das vertentes, elevação, plano e perfil de curvatura, comprimento do caminho do fluxo, etc. Os secundários incluem índice de umidade, índice de transporte de sedimentos e outros (Moore *et al.*, 1993). Dentre estes atributos a elevação, declividade e orientação, são reconhecidos como os mais efetivos para a realização de levantamentos de solos de média escala (Chagas, 2006).

A variável elevação é definida por Burrough (1998) como a distribuição das classes de altitudes, ou dos patamares hipsométricos, em intervalos verticais equidistantes, sendo representada pelo modelo digital de elevação (MDE). Segundo Ribeiro (2003), esta variável fornece informação sobre o relevo que pode caracterizar as formas topográficas de ocorrência de unidades de paisagem e, por consequência, dos solos que nelas existem.

A declividade é definida por Burrough (1986) como sendo um plano tangente a superfície, expresso com a mudança de elevação sobre certa distância. A declividade tem sido considerada um dos mais importantes atributos primários topográficos que controlam os processos pedogenéticos, pois afeta diretamente a velocidade do fluxo de água superficial e subsuperficial e conseqüentemente o teor de água no solo, o potencial de erosão/deposição, e muitos outros processos importantes (Wilson e Gallant, 2000).

O atributo do relevo denominado aspecto se refere à orientação da encosta, dada pela direção da declive. Os valores da grade de aspecto são direções angulares variando de 0° a 360°. Determina a quantidade de radiação solar que atinge uma determinada área (Irvin *et al.* 1997).

O perfil de curvatura foi calculado segundo procedimentos estabelecidos por Moore *et al.* (1991). A curvatura no perfil e a taxa de variação da declividade na direção de sua orientação e esta relacionada ao caráter convexo ou côncavo do terreno, sendo decisiva na aceleração ou desaceleração do fluxo da água sobre o mesmo.

A curvatura no plano é a taxa de variação da declividade na direção ortogonal à da orientação. A curvatura no plano influencia a acumulação da umidade e do fluxo da água superficial e sub-superficial. A partir da curvatura no plano um terreno pode ser convergente, divergente (Hall, 1983; Pennock *et al.*, 2003).

O índice de umidade topográfica é definido como uma função da declividade e da área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo. Tal índice é obtido conforme a equação:

Eq. 2.2.3 $IUT = \ln (As / \tan\beta)$

Onde **As** é a área de contribuição X tamanho da célula do grid em m²; **β** é a declividade da célula. Representa o controle da topografia sobre a unidade do solo (Moore, 1993).

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) expressa a razão entre as bandas do infravermelho próximo e do vermelho; essas duas bandas enfatizam a resposta espectral da vegetação em relação ao solo: as fisionomias com baixa reflectância na banda do vermelho e alta na banda do infravermelho-próximo, típico de uma vegetação verde e sadia, apresentarão altos valores do índice. A alta relação deste índice com a banda do vermelho mostra que quanto menor for a cobertura do solo, menor será o valor do índice (Myneni, 1995). Esse índice é muito utilizado como variável auxiliar para a predição de características ou classes de solos (Zhu et al. 2001).

2.2.2- Predição e mapeamento digital

A ciência da informação pode ajudar a melhorar a eficiência em diversos aspectos do levantamento de solos. Uma oportunidade, a princípio, reside no desenvolvimento da modelagem solo-paisagem, tornando os modelos em poderosas ferramentas de pesquisa. O desenvolvimento desses modelos também pode oferecer a oportunidade de rever os dados, em muitas localizações da paisagem pode-se observar a variação contínua das propriedades do solo (Lilburne, et al., 1998).

Na literatura podemos encontrar diversos trabalhos (McBratney e Webster, 1981; Burgess and Webster, 1984), onde se discute que os métodos tradicionais não consideram a dependência espacial entre as unidades de mapeamento, a qual pode ser forte, principalmente, em se tratando de levantamentos detalhados. O mapeamento digital é baseado em métodos quantitativos e técnicas estatísticas, ao contrário das abordagens tradicionais de mapeamento, que enfatizam o uso do conhecimento empírico (Hengl, 2007). Logo, o modelo discreto, assumido no mapeamento tradicional não é, geralmente, realístico, porque os limites naturais na paisagem tendem a ser mais graduais que abruptos (McBratney, et al., 2003). A predição de propriedades do solo, por exemplo, com base no conhecimento do efeito das variáveis ambientais na formação do solo tem sido a base para o mapeamento do solo, pois usa informações quantitativas

do solo-paisagem que podem descrever a variação real do solo. Modelos numéricos de predição de solo são funções que podem prever classes ou propriedades de solo a partir de dados do solo (Lagacherie e McBratney, 2007).

E, é no Sistema de Informação Geográfica que se estrutura o Mapeamento Digital de Solos (MDS) e pode ser definido como um processo que utiliza técnicas matemáticas da estatística e de outras áreas do conhecimento para a produção de dados georreferenciados do solo, com o apoio de recursos computacionais, e informações auxiliares, além de outros métodos adequados (MacBratney, et al., 2003). O mapeamento digital de solos (MDS) foi utilizado pela primeira vez na cartografia digital de solo por Bell et al (1992, 1994), onde classes de drenagem do solo foram relacionadas a parâmetros da paisagem. O desenvolvimento de métodos de mapeamento digital de solos tem sido uma atividade que vem crescendo muito nas últimas décadas. O MDS está evoluindo, desde a fase de investigação até a produção de mapas em diversas escalas abrangendo países, regiões e bacias hidrográficas (Lagacherie e McBratney, 2007). Sendo visto como uma oportunidade para recuperar o inacabado programa de mapeamento dos solos no Brasil (Mendonça-Santos, et. al, 2006).

Sobre este tema, foi organizado no Rio de Janeiro pela Embrapa Solos com o apoio da União Internacional de Ciência do Solo e da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), o 2nd *Global Workshop on Digital Soil Mapping*, que reuniu 80 pesquisadores de 17 países, para apresentar e discutir os avanços em mapeamento digital de solos. Os resultados desse Workshop foram publicados em *Cd-rom* e uma seleção de *papers* foi publicado pela Springer-Verlag, em 2008 (Hartemink, et al. 2008). Durante o 3rd GWDS, que foi realizado em Utah (USA). Outro importante resultado desse Workshop foi o consenso de se formar um consórcio global de dados e informação sobre os solos do mundo. Este projeto de pesquisa envolve instituições de todo o mundo, com o objetivo de produzir um mapa digital global de propriedades dos solos, disponibilizando também um banco de dados global em solos via Internet e alguns resultados aplicados a áreas com problemas específicos, tais como degradação, contaminação e produtividade dos solos. A União Internacional de Ciência do Solo demonstrou interesse nos resultados obtidos no projeto e, desde 2004, possui um Grupo de Trabalho chamado de *Working Group on Digital Soil Mapping*, ligado às Comissões de Geografia do Solo e Pedometria (<http://www.globalsoilmap.net/>).

Em novembro de 2008, uma concessão foi obtida da Fundação Bill & Melinda Gates e a Aliança para uma Revolução Verde na África (AGRA) para mapear regiões na

África Sub-Sahariana, e coletar todos os dados disponíveis. A partir dessa concessão, há também fundos para coordenar os esforços globais e para o estabelecimento de um consórcio global. Várias instituições têm assumido um papel de liderança neste esforço ([http: www.globalsoilmap.net/](http://www.globalsoilmap.net/)).

Infelizmente as bases de dados de solos existentes são, em geral, incompletas e muitas vezes organizadas de forma inadequada, o que torna difícil a utilização destas bases para promover o uso extensivo, com credibilidade de informação, sobre o solo. A principal razão é que as capacidades atuais só permitem o armazenamento de dados convencionais de levantamentos de solos, que são em geral escassos e, esporadicamente, disponíveis (Lagacherie e McBratney, 2007).

No Brasil, os levantamentos de solos são ainda necessários, principalmente em escalas maiores, para apoiar a avaliação dos recursos do solo para planejamento e gestão de projetos agrícolas e ambientais. Levantamentos de solos detalhados e semi-detalhados estão agora disponíveis em pequenas áreas (como no estado de São Paulo), para apoiar locais específicos em projetos. No entanto, extensas áreas do país não dispõem de informações completas do solo em escalas adequadas para apoio de soluções de problemas atuais de utilização, gestão, conservação, prevenção e recuperação da agricultura e de áreas degradadas. A grande extensão territorial, as desigualdades regionais, falta de orçamento, a falta de recursos materiais e humanos e insuficiente apoio institucional obrigaram o país a optar pela execução das escalas generalizadas (Mendonça-Santos e Santos, 2006).

Regressão Linear Múltipla (RLM) e Regressão - Krigagem (RK)

A regressão linear múltipla (RLM) é um método utilizado para modelar a relação linear entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. A análise de regressão também é usada para entender a relação entre as variáveis relacionadas com a variável dependente, e explorar as formas dessas relações. Em circunstâncias restritas, a análise de regressão, é usada para inferir relações causais entre a variável independente e as variáveis dependentes. Um grande número de técnicas para a realização de análise de regressão tem sido desenvolvido (Berk, 2004).

Regressão –Krigagem

Regressão-krigagem (RK) é o método híbrido que combina um modelo de regressão simples ou múltipla linear com krigagem dos resíduos da regressão (Odeh, et al. 1995).

Muitos pesquisadores buscam algo mais flexível, mais abrangente e técnicas mais robustas (de preferência implementado em um software amigável). Na verdade, muitos geoestatísticos esperam que o modelo de predição linear para dados espaciais (Gotway e Stroup, 1997; Stein, 1999; Christensen, 2001), como a técnica de mapeamento chamada de regressão + krigagem (**RK**) (Hengl, 2007).

A RK é uma técnica de interpolação espacial, que combina uma regressão da variável dependente de variáveis auxiliares (como derivadas de terreno, imagens de satélite e mapas temáticos) com krigagem dos resíduos da regressão (Pebesma, 2006). Regressão-krigagem foi um termo cunhado por Odeh et al., (1994). Refere-se a métodos de regressão, que combinados com variáveis auxiliares e krigagem. Odeh et al., (1994, 1995b) definiram três tipos de RK: Tipo A, chamado de “combinação de krigagem com regressão” por Knotters et al. (1995), onde a regressão é executada, seguida por krigagem dos valores da regressão. Tipo B, chamado de “krigagem com um palpite de campo”, por Ahmed e Marsily (1987), que envolve regressão e cálculo dos resíduos, seguido por krigagem dos valores da predição da regressão e dos resíduos separadamente, e depois a soma dos dois valores para obter a predição final. Tipo C, semelhante ao tipo B, mas apenas krigagem dos resíduos, somando os valores preditos da regressão e com os valores da krigagem dos resíduos, para obter a predição final. Na RK, uma vez que parte da variação determinística foi estimada, o resíduo pode ser interpolado usando a krigagem e o resultado adicionado à tendência estimada (Figura 2.2.1).

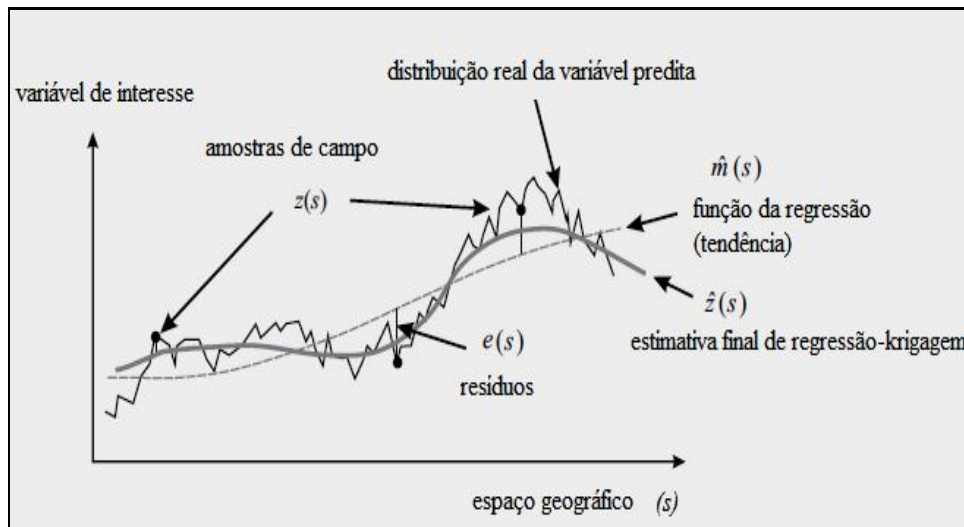


Fig.: 2.2.1. Um exemplo esquemático de regressão-krigagem: distribuição de uma variável ambiental. Fonte: (Hengl, 2007).

No caso dos modelos de RK, os resíduos de regressão representam incertezas que precisam ser incorporadas ao sistema. A importância disto é que a krigagem dos resíduos (erro), após a regressão, podem melhorar o desempenho da predição em comparação com a regressão sem a adição da krigagem dos resíduos (Odeh, et al. 1995b).

Este método de RK pode ser considerado um dos métodos mais usado entre os pesquisadores na área de pedometria (por exemplo, Finke et al. (2004); Baxter e Oliver (2005); Herbst et al. 2006; Simbahan et al., 2006, entre outros).

Krigagem

A krigagem é um processo de estimação por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes por uma função denominada variograma. O termo “Krigagem” foi usado por Matheron, em 1965, em homenagem ao Engenheiro de Minas Sul-Africano Daniel G. Krige, que primeiro formulou e implementou essa forma de interpolação, em 1951 (Journel, 1987).

A Teoria das Variáveis Regionalizadas proposta por Matheron, em 1971 e o conseqüente emprego da interpolação em geoestatística (krigagem) além da evolução da ciência da computação e dos sistemas de informação geográfica, os mapas-base podem

ser elaborados automaticamente como mapas de isolinhas (McBratney e De Gruijter, 1992, Burroughs et al., 1997 e McBratney e Odeh, 1997 e Zimback, 2001).

Landim (1998) descreve a krigagem como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada, a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

Os parâmetros do semivariograma podem ser observados diretamente da Figura 2.2.2. Esses parâmetros são segundo Journel e Huijbregts (1978):

- *Amplitude ou range e/ou alcance: (a)*: que indica a distância a partir da qual as amostras passam a não possuir correlação espacial e a relação entre elas torna-se aleatória; toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual à amplitude fornece informações sobre o ponto.
- *Patamar ou sill ou silo (C)*: é o valor do semivariograma correspondente ao seu *alcance (a)*. Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras,
- *Continuidade ou nugget e/ou efeito pepita (C₀)*: por definição, $(0)=0$. Entretanto, na prática, à medida que **h** tende para **0** (zero), **(h)** se aproxima de um valor positivo chamado *Efeito Pepita (C₀)*. O valor de C_0 revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (Isaaks e Srivastava, 1989). O efeito pepita é um importante parâmetro do semivariograma que indica a variabilidade não explicada, que pode ser originada dos erros de medição ou de microvariação não detectadas, quando é considerada a distância da amostragem utilizada (Cambardella, et al. 1994).

O semivariograma experimental fornece valores experimentais do semivariograma para um número finito de lags (refere-se a uma distância pré-definida, a qual é utilizada no cálculo do semivariograma) em diferentes direções. Funções contínuas devem ser ajustadas a esses valores experimentais para que os valores de semivariogramas possam ser deduzidos para qualquer lag nos procedimentos inferências.

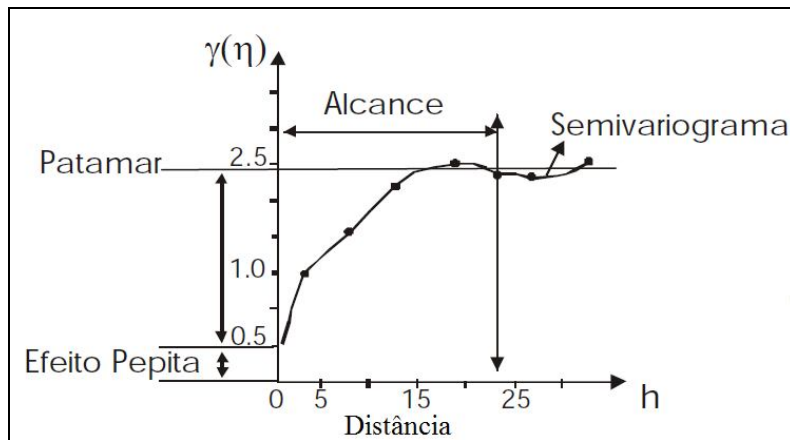


Figura 2.2.2: Parâmetros do semivariograma. Fonte: Guimarães, 2004.

Entre os instrumentos geoestatístico, o semivariograma é um dos principais instrumentos para estudo espacial de propriedades do solo (Webster e Burgess, 1984). Segundo Vieira (1995) após a construção do semivariograma, uma função contínua deve ser ajustada as semivariâncias experimentais. Através dos semivariograma, pode-se verificar e modelar a dependência espacial de uma variável, sendo possível estimar dados para um mapeamento posterior da mesma, sendo o interpolador que utiliza o semivariograma para modelagem chamada de krigagem.

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da Teoria das Variáveis Regionalizadas. Todos os cálculos da Geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada. Se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos seguintes também estarão. Quanto mais simples puder ser o modelo ajustado, melhor. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(h)$ em relação a h . Dependendo do comportamento de $\gamma(h)$ para altos valores de h , os modelos podem ser classificados em: modelos com patamar (“Sill”) e modelos sem patamar (Journel e Huijbregts, 1978).

Nos principais modelos a seguir, C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar, e a é o alcance do semivariograma, segundo Journel e Huijbregts (1978); Spring (1996) (Figura 2.2.3):

- a) **Modelo Esférico:** Trata-se do modelo mais comum, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica. O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita e do patamar,

depois passando uma reta que intercepta o eixo Y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$.

b) Modelo Exponencial: No modelo exponencial, a curva é exponencial junto à origem e a tangente nesse ponto é vertical. Uma diferença fundamental do modelo exponencial para o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza. Os parâmetros C_0 e C_1 para os modelos exponencial e gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

c) Modelo Gaussiano: No modelo Gaussiano, a curva é parabólica junto à origem e a tangente nesse ponto é horizontal. Isto demonstra pequena variabilidade para pequenas distâncias.

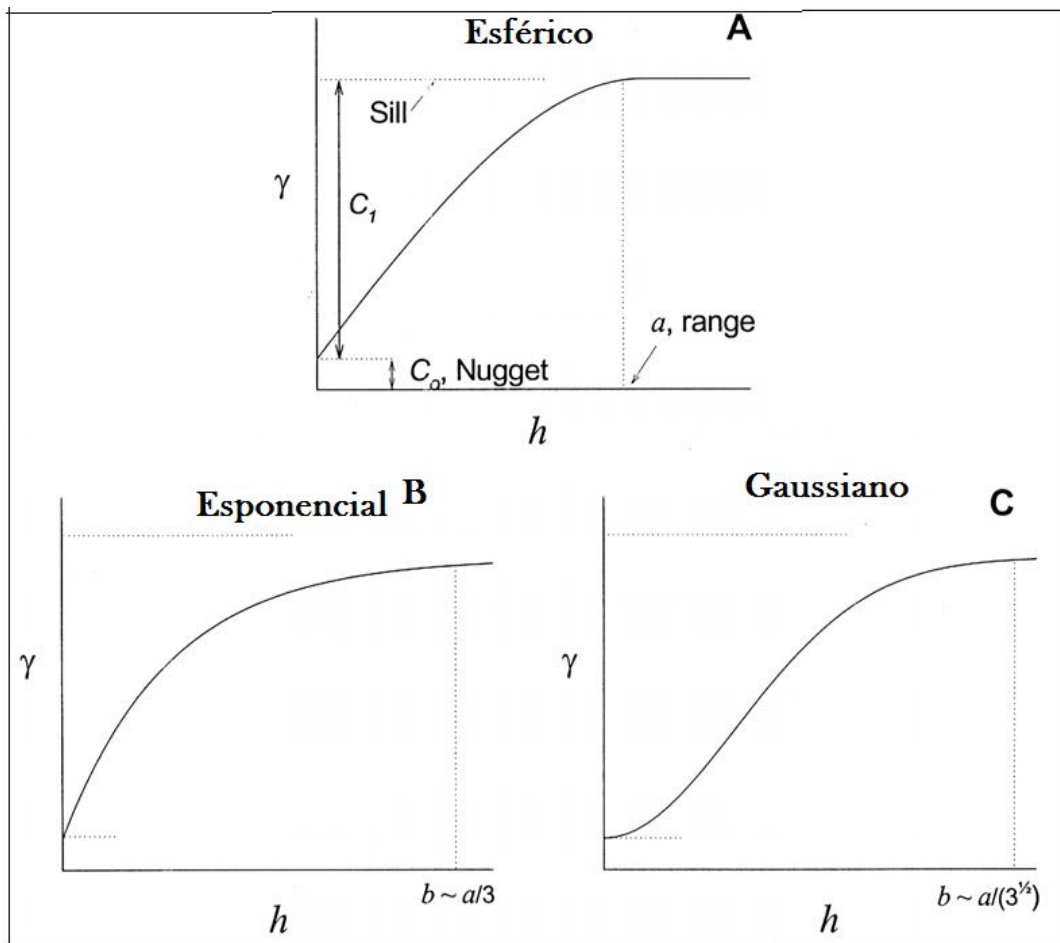


Figura 2.2.3: Modelos do semivariograma.
Fonte: Lembo e Magri (2002)

3 _ Materiais e Métodos

3.1 – Área de Estudo

As Regiões Norte, Noroeste e Serrana do Estado do Rio de Janeiro, juntas, localizam-se entre as coordenadas 43°22'35''; 40°57'27''WG, e 20°45'47''; 22°34'21''S, com 22.043 km². A área é caracterizada por 5 grandes tipos de paisagem: Faixa Litorânea, Norte-Noroeste Fluminense, Planalto do Alto Itabapoana, Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos, dos 8 geoambientes existentes no Estado do Rio de Janeiro (Lumbreras, et al. 2004).

A região Norte fluminense é composta por nove municípios: Campos dos Goytacazes, Carapebus, Cardoso Moreira, Conceição de Macabu, Macaé, Quissamã, São Fidélis, São Francisco de Itabapoana e São João da Barra (Figura 3.2.1) (IBGE, 2009). Esta situada na área mais setentrional do litoral fluminense, nos baixos cursos dos rios Macaé e Paraíba do Sul; possui um território formado pela Serra do Mar, tabuleiros costeiros e planície costeira. Destaca-se o Delta do Paraíba do Sul, construído pelos sedimentos do rio e a ação das correntes marinhas, que são responsáveis pela formação de cordões litorâneos, praias, planícies, terraços marinhos, lagoas e canais. Este conjunto é denominado como Baixada dos Goytacazes ou Baixada Campista. A sua localização, numa grande planície, favoreceu o desenvolvimento da atividade agrícola (Dantas, et al. 2001).

A região Noroeste localiza-se na área mais setentrional do interior fluminense. É composta por treze municípios: Itaperuna, Aperibé, Bom Jesus do Itabapoana, Cambuci, Italva, Itaocara, Laje do Muriaé, Miracema, Natividade, Porciúncula, Santo Antônio de Pádua, São José do Ubá e Varre-Sai (Figura 3.2.1) (IBGE, 2009). O território compõe o Vale do Paraíba do Sul na unidade geomorfológica denominada Depressão Escalonada dos Rios Pomba-Muriaé, formada por várias serras e vales encaixados em falhas estruturais. A área com maior altitude, ao norte, corresponde a uma parte da Serra da Mantiqueira, chamada Mantiqueira Setentrional (Dantas, et al. 2001).

A região Serrana é importante pela sua beleza e diversidade econômica no contexto do estado do Rio de Janeiro. É composta por quatorze municípios: Petrópolis, Nova Friburgo, Teresópolis, Bom Jardim, Cantagalo, Carmo, Cordeiro, Duas Barras, Macuco, Santa Maria Madalena, São José do Vale do Rio Preto, São Sebastião do Alto, Sumidouro e Trajano de Moraes (Figura 3.2.1) (IBGE, 2009). A região está localizada

no interior do estado, na sua porção central. A maior parte do seu território é constituída pela formação geomorfológica denominada escarpas e reversos da Serra do Mar, que neste trecho recebe o nome de Serra dos Órgãos. Mais ao norte, nos municípios de Cantagalo e Carmo, atinge o Vale do Paraíba do Sul, na unidade identificada como Alinhamento de Crista do Paraíba do Sul (Dantas, et al. 2001; Lumbreras, et al. 2004).

3.1.1 – Aspectos físicos:

No Norte Fluminense destaca-se a baixada Campista, que consiste de uma extensa planície deltaica, caracterizada por diversos ambientes deposicionais: vastos depósitos flúvio-lagunares, ou brejos no entorno da lagoa Feia. Esses terrenos inundáveis estão separados da costa por um cordão arenoso, estendendo-se em direção à localidade de Farol de São Tomé. Apresentam solos (Figura 3.1.1) com altos teores de sais e enxofre como os Gleissolos Salinos e/ou Tiomórficos, sendo, portanto, altamente limitantes às atividades agropecuárias, principalmente junto às lagunas. Junto à foz do rio Paraíba do Sul desenvolve-se um sistema de cristas de cordões arenosos em linha de costa progradante, com características similares às planícies costeiras situadas na região dos Lagos. A baixada flúvio-deltaica construída pelo rio Paraíba do Sul, por sua vez, possui solos melhor drenados e bastante férteis que são os Neossolos e Cambissolos Flúvicos, adequados para a expansão das atividades agrícolas. Tradicionalmente ocupada pela monocultura canavieira, a baixada Campista pode ser mais bem aproveitada como um pólo de fruticultura, assim como os tabuleiros adjacentes. Esses tabuleiros, constituídos por sedimentos terciários do Grupo Barreiras, ocupam vastas porções dos municípios de Quissamã, Campos e São Francisco do Itabapoana, formando terrenos planos ou suavemente ondulados e solos profundos e bem drenados como os Latossolos e Argissolos Amarelos. Apesar de esses solos terem uma fertilidade natural baixa, são terrenos recomendados para expansão da agricultura irrigada, devido à baixa suscetibilidade à erosão. (Lumbreras, 2004; Dantas, et al. 2001; Embrapa, 1999). A figura 3.1.2 ilustra as porcentagens quantificando os principais tipos de solos na região Norte, onde somente os Argissolos representam 43,88% do total. Os Latossolos são os segundo solos mais representativos da região com 17, 19%.

O clima da região Norte, de acordo com dados obtidos nas estações de São Fidelis, Santa Maria Madalena e Macabuzinho, apresenta caráter estacional, sendo os

principais tipos climáticos da região continental baixa: úmido, com pouco ou nenhum déficit hídrico; megatérmico, com calor bem distribuído no ano, e sub-úmido. Na vertente atlântica, o clima predominante é o úmido, com pouco ou nenhum déficit hídrico; mesotérmico, com calor bem distribuído o ano todo, sem evidência de longos períodos com ventos. De acordo com a classificação de Köppen, o clima do é do tipo Cwa e a precipitação média anual de 1.440 mm (Dantas, et al. 2001).

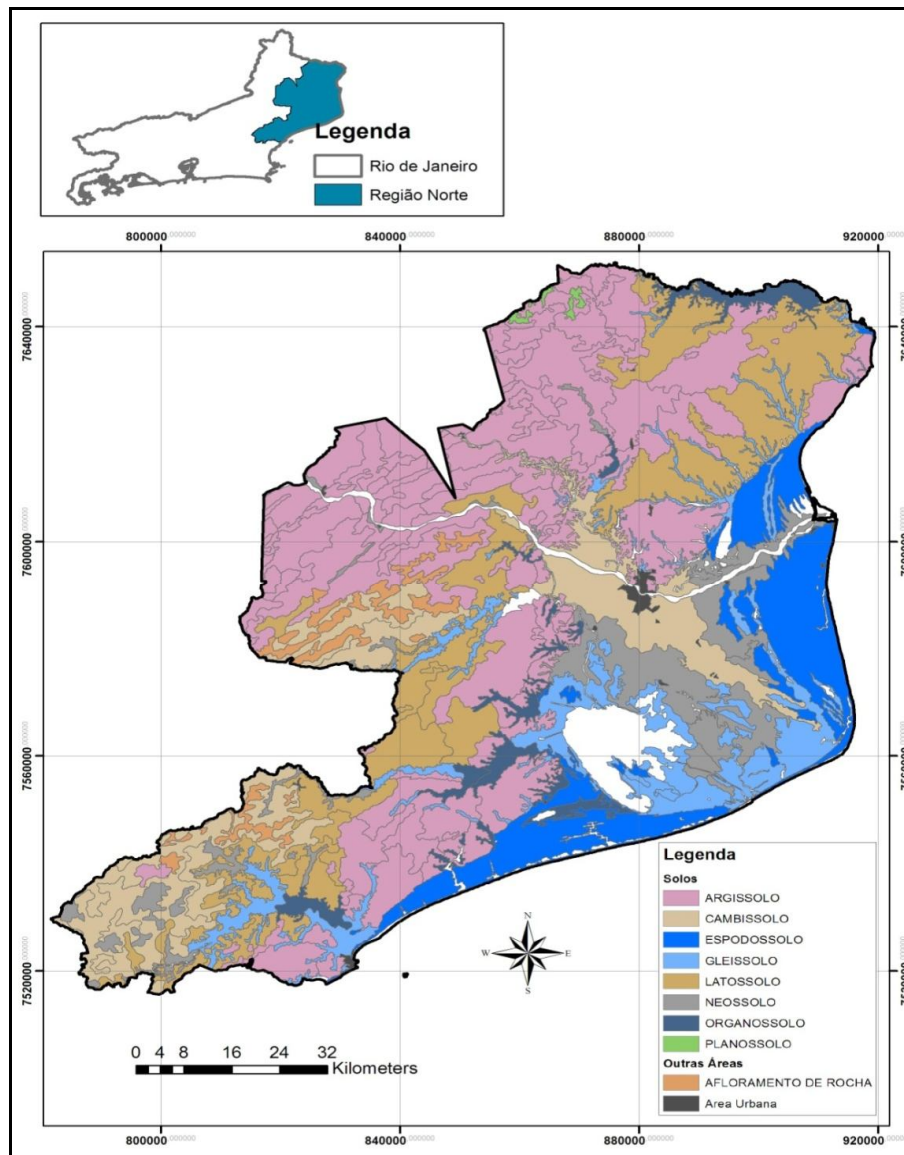


Figura 3.1.1: Solos da região Norte do Estado do Rio de Janeiro. Lumbreras, et al (2004); Carvalho Filho (2005).

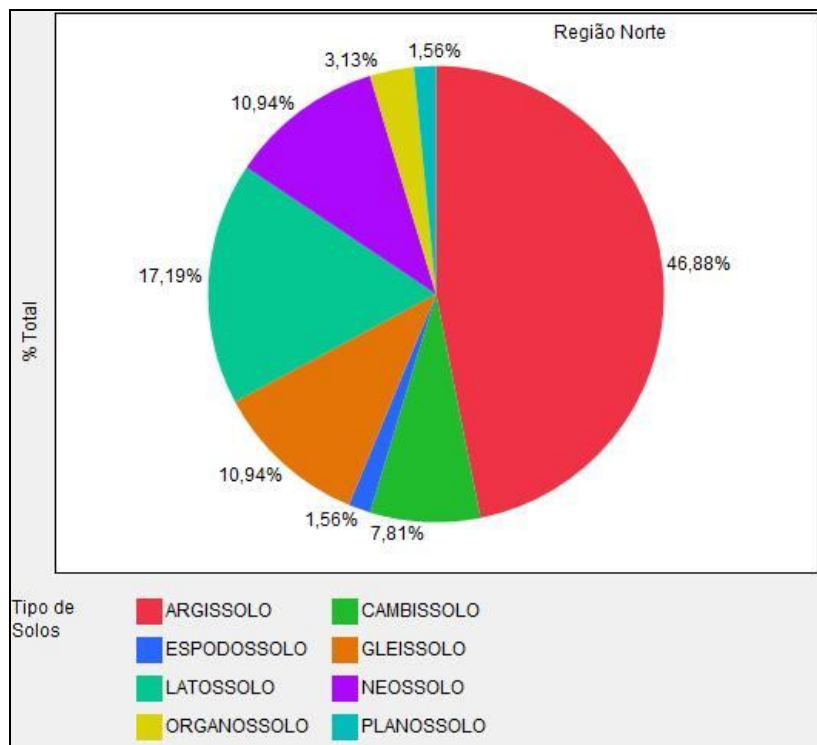


Figura 3.1.2: Tipos de solo representados em porcentagem na região Norte. Lumberas, et al (2004)

Na região Noroeste Fluminense encontra-se um relevo bastante movimentado com altitudes que variam entre 35 a 680 m no sentido norte em direção à Serra da Mantiqueira e a partir da calha do rio Paraíba do Sul. A declividade também vai se acentuando da classe 15 a 20% para classe maior que 45%. Ocorrem colúvios *sensu stricto* e colúvio saluvionares. Predominam depósitos quaternários. A geologia da região caracteriza-se por rochas do Complexo do Paraíba do Sul (paragneisses quartzofeldspáticos, com granada e sillimanita, lentes de rochas carbonáticas, calcissilicáticas, camada de quartzitos e gonditos, também granitóides e localmente, migmatitos) e pelo Complexo Juiz de Fora (composto por granulitos e charnockitos) que apresentam estruturas de dobras (CIDE, 2005; Dantas, et al. 2001).

O Noroeste fluminense insere-se no setor semi-úmido do estado. Isto significa que a estação seca é bastante pronunciada, ocasionando déficit hídrico em toda a região. Esta situação é provocada pela atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Este sistema de alta pressão provoca uma grande estabilidade atmosférica ao longo de todo o período de outono-inverno. Esta estabilidade só é alterada quando ocorre a entrada de frentes frias. Deve-se ressaltar que devido ao período do ano, a convergência de umidade para o sistema frontal é muito baixo, reduzindo acentuadamente a sua

capacidade pluvial. Em função disto, o ambiente se ressentia da falta de água, originando uma floresta semi-estacional, onde parte das árvores perde as folhas nesta época do ano (Dantas, et al. 2001).

Na região Noroeste, embora predomine relevo fortemente ondulado, a topografia é bastante variável, com influência sobre as características dos solos. Assim, nos relevos mais rebaixados, de conformação suave (suave ondulado e ondulado) contíguos às baixadas, predominam Argissolos (Figura 3.1.3) com elevado gradiente textural (são em geral abruptos). Estes solos estão associados com Gleissolos, ou, menos freqüentemente, com Planossolos, ambos situados nas baixadas. Nas áreas mais íngremes, relacionadas aos relevos serranos residuais e às escarpas que marcam a transição com a superfície mais elevada do Planalto do Alto Itabapoana, Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos ocorrem, por vezes, associados a afloramentos de rocha (Lumbreras, et al, 2004). A figura 3.1.4 ilustra as porcentagens quantificando os principais tipos de solos na região Noroeste, onde somente os Argissolos representam 43,88% do total. Os Latossolos são os segundos mais representativos da região com 17,19%.

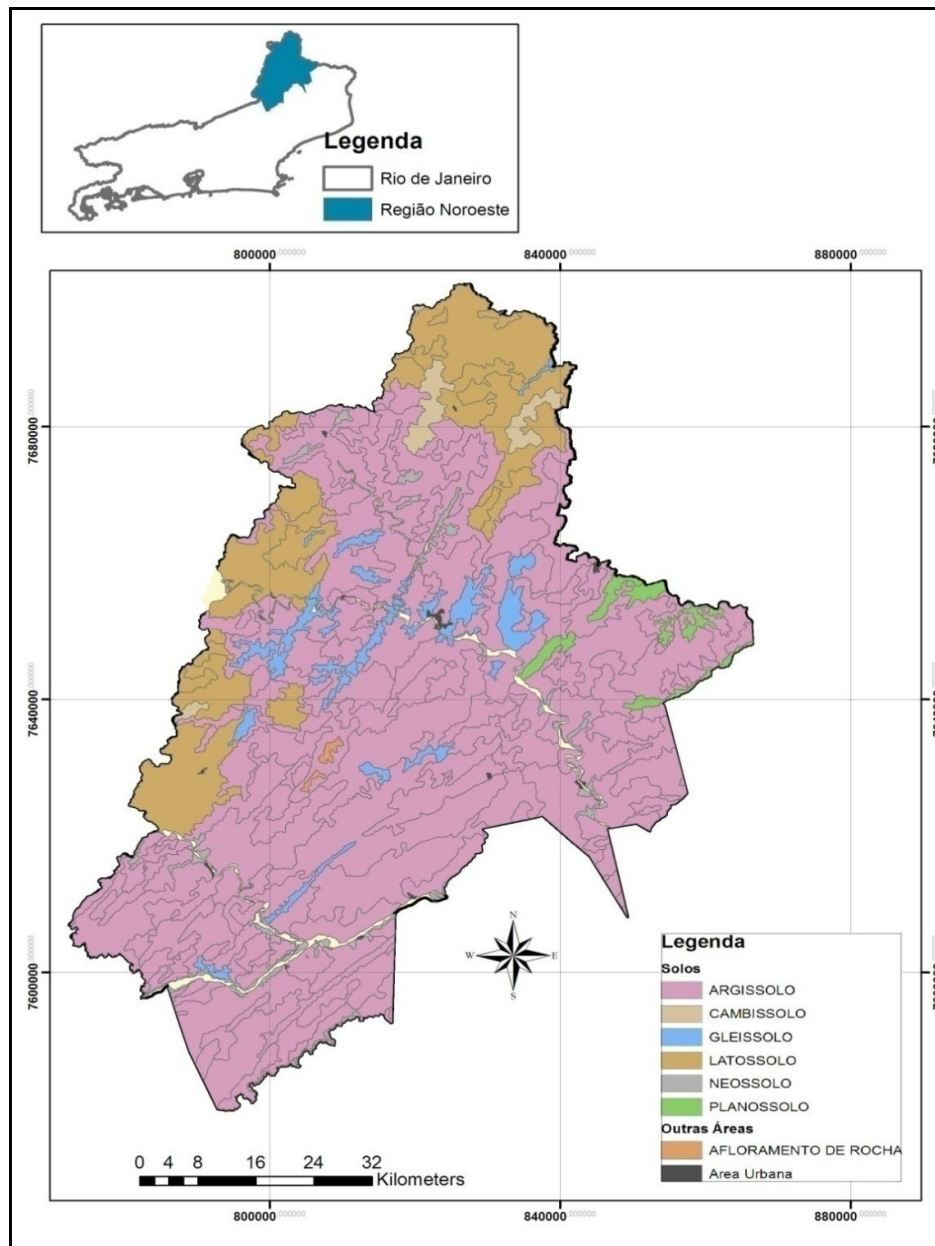


Figura 3.1.3: Solos da região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Lumbreras, et al (2004); Carvalho Filho (2005).

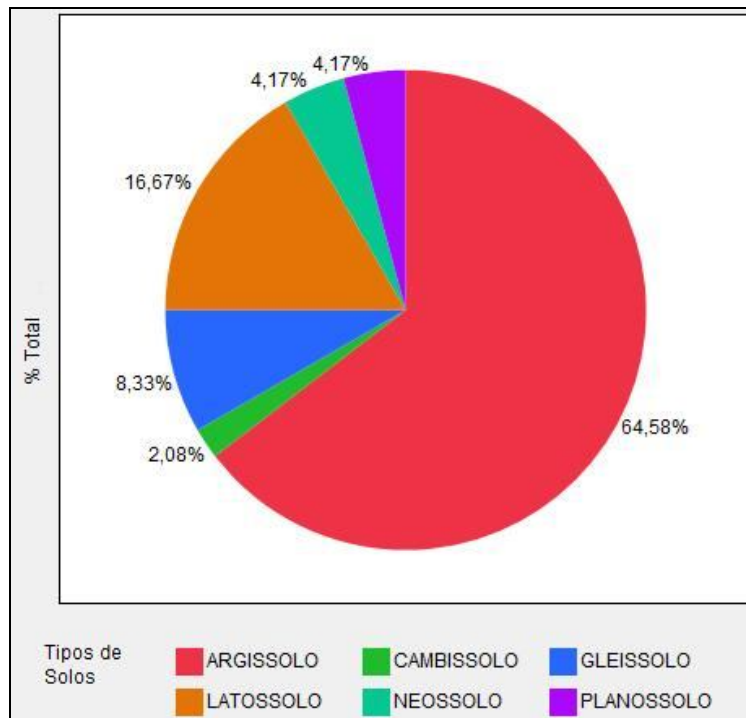


Figura 3.1.4: Tipos de solo representados em porcentagem na região Noroeste. Lumbreras, et al (2004)

A região Serrana é constituída por zonas mais elevadas das escarpas serranas e das zonas montanhosas, são constituídas por solos rasos ou paredões sub-verticais rochosos. Um caso peculiar registra-se no planalto do Itatiaia (que está fora da área de estudo) e, em menor escala, no planalto do Açu, entre Petrópolis e Teresópolis. Esses planaltos alçados a 2.200m de altitude possuem um clima frio e solos muito rasos para o desenvolvimento da cobertura florestal. Nestes planaltos muito elevados, os terrenos são recobertos por campos de altitude. Os solos dessa região são formados principalmente por Argissolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos (Figura 3.1.5) (Lumbreras, et al, 2004).

Os Argissolos são solos minerais bem drenados, essa classe de solos é muito susceptível à erosão em sulcos e laminar, muito rápida/lenta; a erosão ainda é acelerada pelas vertentes íngremes do relevo forte ondulado e montanhoso (Carvalho Filho, 2003; Lumbreras, et al. 2004).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos são solos minerais com horizonte B latossólico, em geral, profundos e muito profundos, ocorrendo, em menores proporções, variedades pouco profundas com presença de horizonte C. Essa classe de solos apresenta susceptibilidade à erosão nula a ligeira nas condições naturais, porém, sob

utilização agropecuária, com práticas de manejo inadequadas, é facilmente compactável, ocorrendo erosão laminar forte e, não raro, os horizontes superficiais são carreados pelas águas que escorrem superficialmente, devido à compactação. O relevo forte ondulado e montanhoso das regiões serranas favorece a aceleração dos processos erosivos (Lumbrearas, et al. 2004; Dantas, et al. 2001).

Os Cambissolos são solos minerais rasos ou pouco profundos, em geral, bem drenados. Essa classe de solo ocupa áreas frágeis, e, por conseguinte apresenta susceptibilidade à erosão extremamente forte; normalmente, ocorre em cabeceiras de drenagens e/ou vertentes muito íngremes dos relevos forte ondulados e montanhosos. Ocorrem, em geral, em áreas erodidas, não raro associadas a voçorocas e deslizamentos e intermediários entre Argissolos e Latossolos e/ou Cambissolos (Lumbrearas et al. 2004; Sylvio, et al, 2000). A figura 3.1.6 ilustra as porcentagens quantificando os principais tipos de solos na região Serrana, onde como nas demais regiões os Argissolos e os Latossolos são os mais freqüentes na região. Somente os Argissolos representam 51,67% do total. Os Latossolos são os segundo solos mais representativos da região com 28,33%.

O clima da região Serrana, de acordo com a classificação de Köppen, é úmido e ameno, tropical de altitude, com temperaturas que variam de 8 a 25 graus durante o ano. Este clima é indicado para o incremento do sistema agroflorestal. As atividades agrícolas, com destaque para a olericultura, ocupam as restritas planícies fluviais e as baixas vertentes menos declivosas do domínio montanhoso desta região.

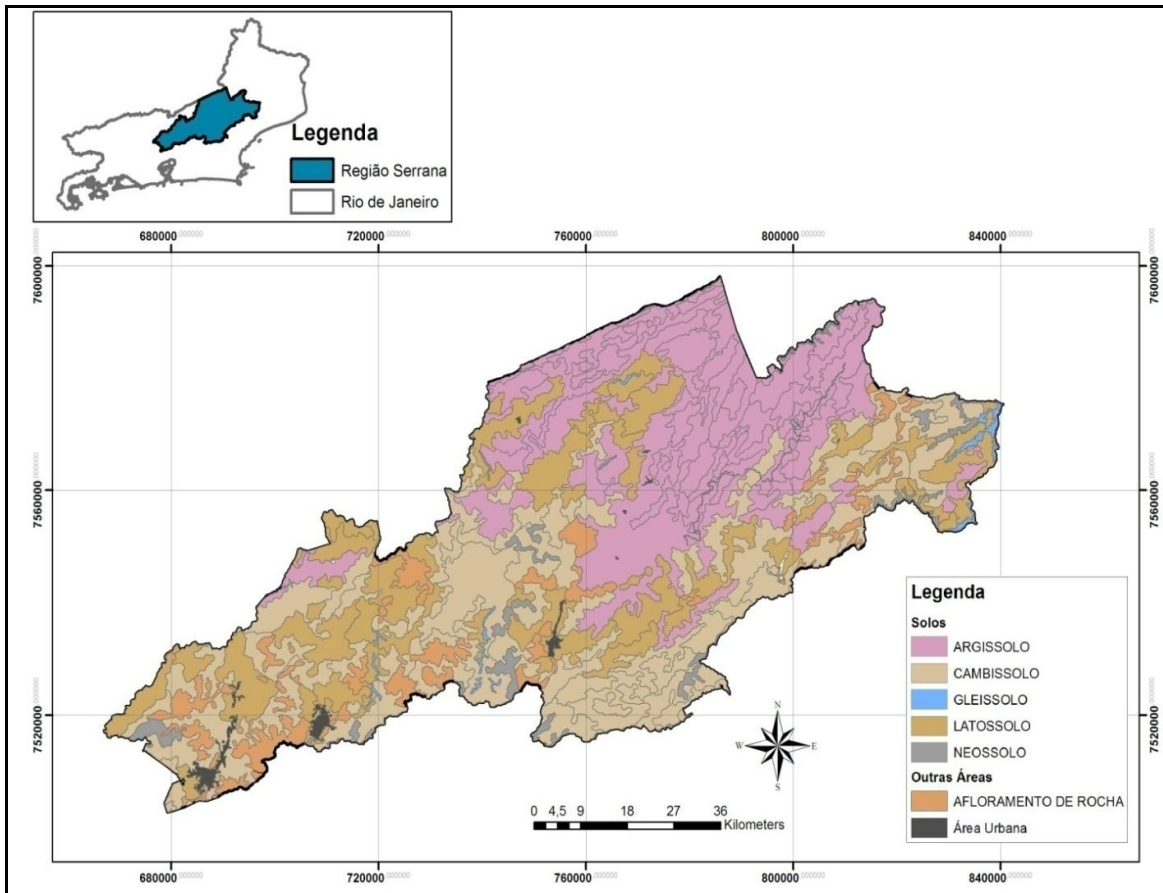


Figura 3.1.5: Solos da região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Lumberras, et al (2004); Carvalho Filho (2005).

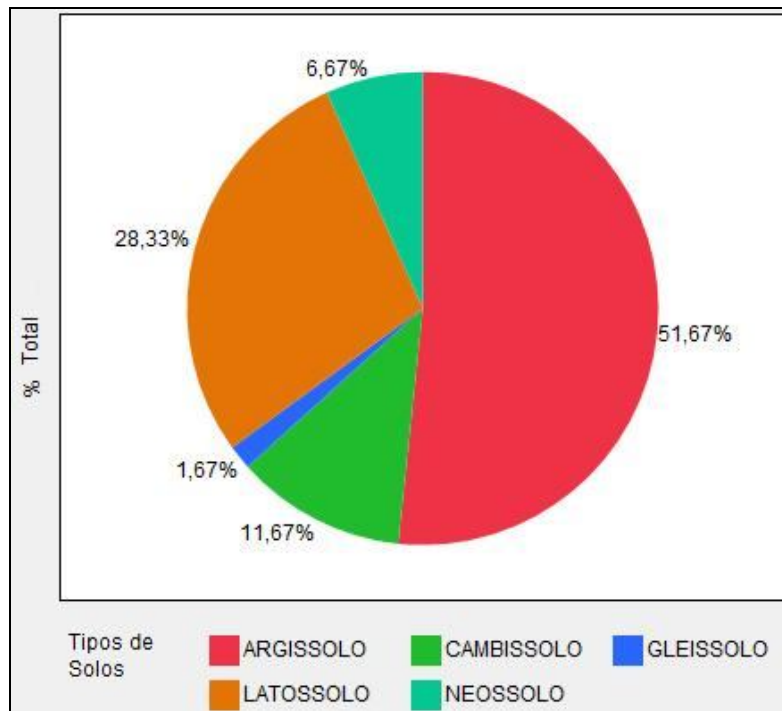


Figura 3.1.6: Tipos de solo representados em porcentagem na região Noroeste. Lumberras, et al (2004).

3.2 – Etapas da Pesquisa

O Banco de dados de propriedades do solo e o banco de dados de variáveis ambientais

Este trabalho utilizou dados de propriedades de atributos químicos de solos resultantes de diversos trabalhos da Embrapa Solos e organizado no escopo do projeto FAPERJ E-26/171.360/2001): “Modelagem da magnitude e distribuição espacial do Carbono Orgânico do Estado do Rio de Janeiro, usando técnicas quantitativas, SIG e Base de Dados” (Santos, et al. 2008). Este banco de dados contém 731 perfis de solos, 2.744 horizontes e 48 propriedades do solo, normalmente descritos nos Levantamentos de Solos realizados pela Embrapa. Este banco de dados de solos foi construído em Access e Delphi para facilitar a recuperação, a seleção, a análise e a revisão dos dados de cada perfil de solo descrito na área de estudo, como também o georreferenciamento de cada perfil (Mendonça-Santos, et al, 2007a).

O banco de dados de fertilidade do solo que deu suporte a este trabalho de tese foi organizado pela seleção de algumas variáveis que controlam ou influenciam a fertilidade dos solos em geral, e dos solos tropicais em particular, a saber: carbono orgânico (Corg), fósforo assimilável (P_{ass}), potássio (K^+), pH em água, capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), e saturação por alumínio (m). Essas propriedades de atributos é que serão modeladas neste trabalho, para fins de mapeamento digital da fertilidade dos solos.

Foram selecionados 228 perfis da área de estudo na camada de 0 a 10 cm, sendo 133 perfis na região Norte, 45 perfis na região Noroeste e 50 perfis na região Serrana do ERJ. Foi organizado o banco de dados, confrontando-os, quando necessário, com dados originais de laboratório. A figura 3.2.1 ilustra a localização dos municípios das três regiões. A figura 3.2.2 ilustra as três regiões da área de estudo com a localização dos pontos amostrados.

A figura 3.2.3 mostra o fluxograma completo deste trabalho. Paralelamente à organização e análise dos dados de solo, diversas fontes de dados ambientais foram utilizadas para a obtenção das variáveis ambientais a serem utilizadas na modelagem solo-paisagem. São elas: Uso da terra (bandas 7, 4 e 2 em R(vermelho), G(verde) e

B(azul)), livremente distribuídas pela NASA (NASA, 2007); o índice NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada- (usando faixa 2 em vez de 3 do Landsat 7), mapas de classes litológicas (CPRM, 2001) e imagens SRTM¹, obtidas em: <<http://srtm.csi.cgiar.org/>> (JARVIS et al. 2006) e corrigidas por Mendonça-Santos et al (2008). Estes mesmos dados foram utilizados anteriormente nos trabalhos de Mendonça-Santos, et al. (2008) que também basearam o presente trabalho.

Utilizou-se o programa *Erdas 9.0* (Leica Geosystems, 2003), onde foi elaborada uma malha de 90m, extraída do *SRTM MDT* (Modelo Digital de Terreno), que será usada para mapeamento digital das propriedades do solo. Para obter o recorte da área das três regiões e fazer a extração de dados nos perfis. Dessa forma, foram organizados o banco de dados auxiliares de variáveis ambientais e o banco de dados de atributos químicos da fertilidade do solo, como está apresentado no fluxograma (Figura 3.2.3).

Em seguida, foi organizado no programa *JUMP® 6.0* (Sall, 1990) um banco de dados com as variáveis químicas do solo nos perfis e as variáveis ambientais nos perfis (Figura 3.2.3), para a realização da regressão linear múltipla. Para cada área de estudo foi organizado outro banco de dados com informações de variáveis ambientais de toda a área (Figura 3.2.5) das três regiões separadas, para a realização da RLM + krigagem de acordo com McBratney et al (2003). As planilhas de dados foram organizadas por região de estudo e dessa forma, os resultados obtidos serão organizados, com as seguintes variáveis: Classes de Solos, Litologia, NDVI e os atributos de terreno que são: Elevação, Aspecto, Plano de Curvatura, Perfil de Curvatura e Índice de Umidade.

¹ SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) é uma missão liderada pela Nasa. Consiste em um sistema de imagem de radar distribuída gratuitamente para as Américas do Sul e do Norte, com resolução espacial de aproximadamente 90 X 90 metros (Nasa, 2009).

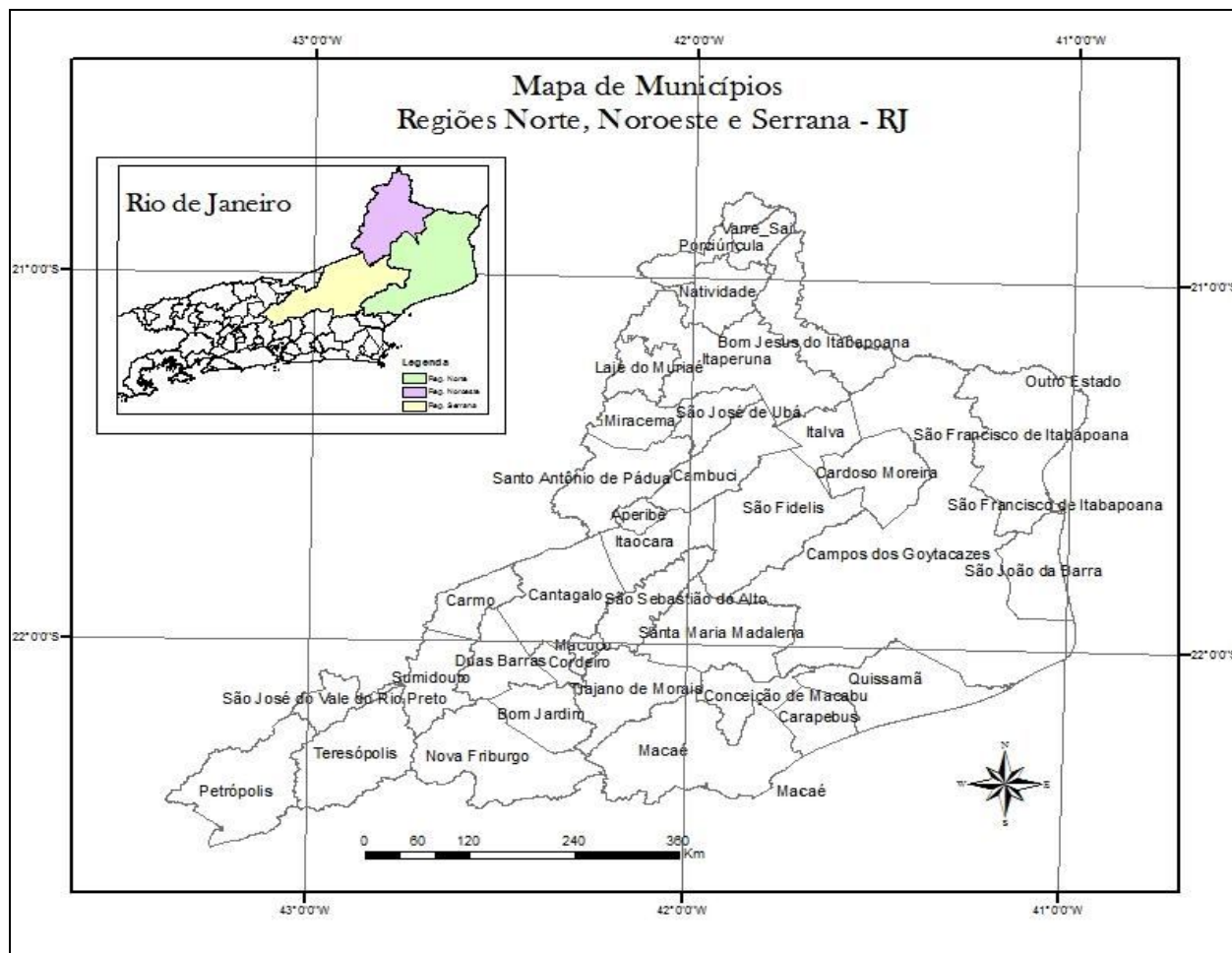


Figura 3.2.1. Mapa de municípios das regiões Norte, Noroeste e Serrana do Rio de Janeiro. (Fonte: IBGE, 2008).

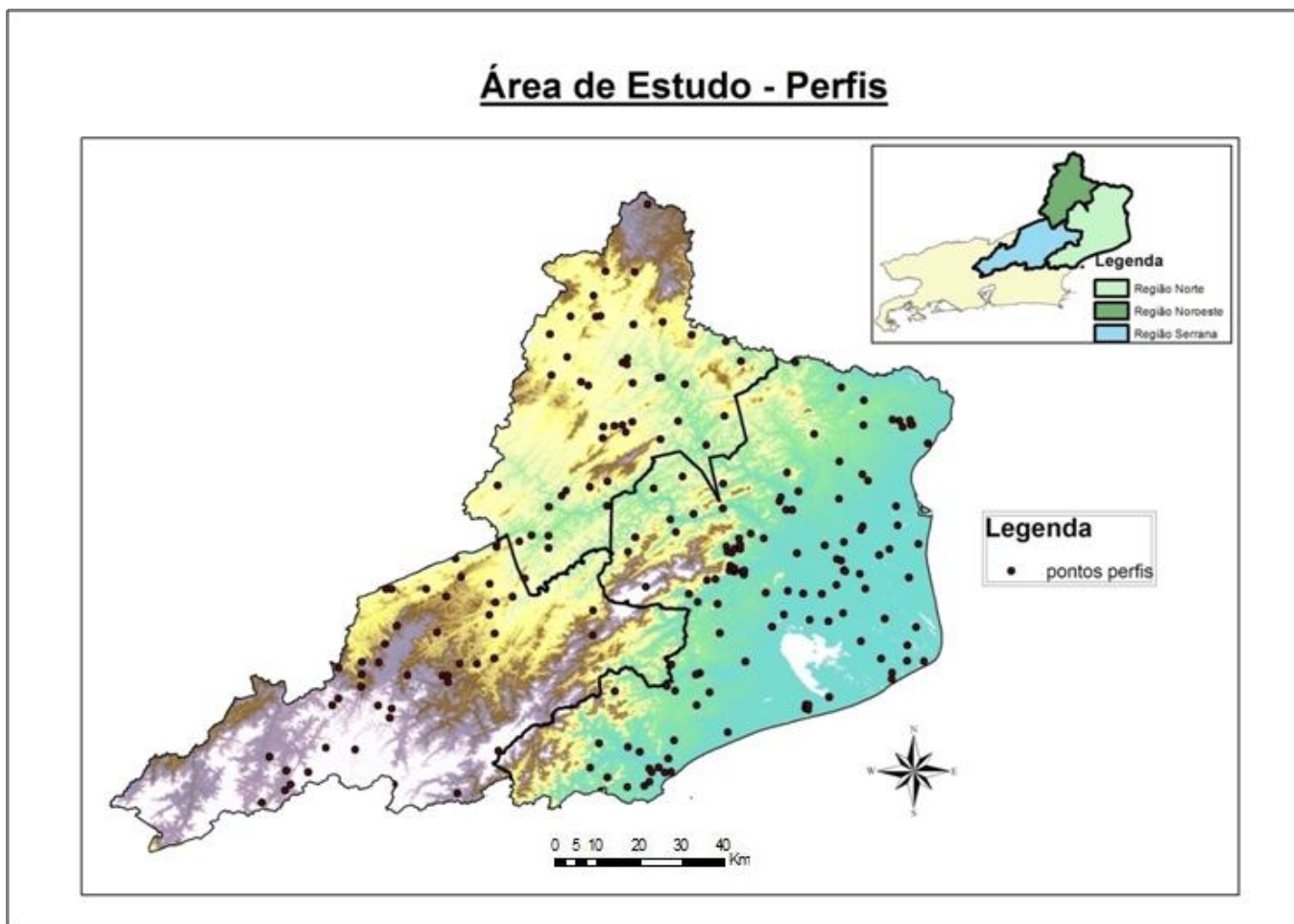


Figura 3.2.2: Área de Estudo (Regiões Norte, Noroeste e Serrana) com a localização dos pontos amostrados. Imagem de Elevação (3D). WGS_1984_UTM_Fuso 23S.

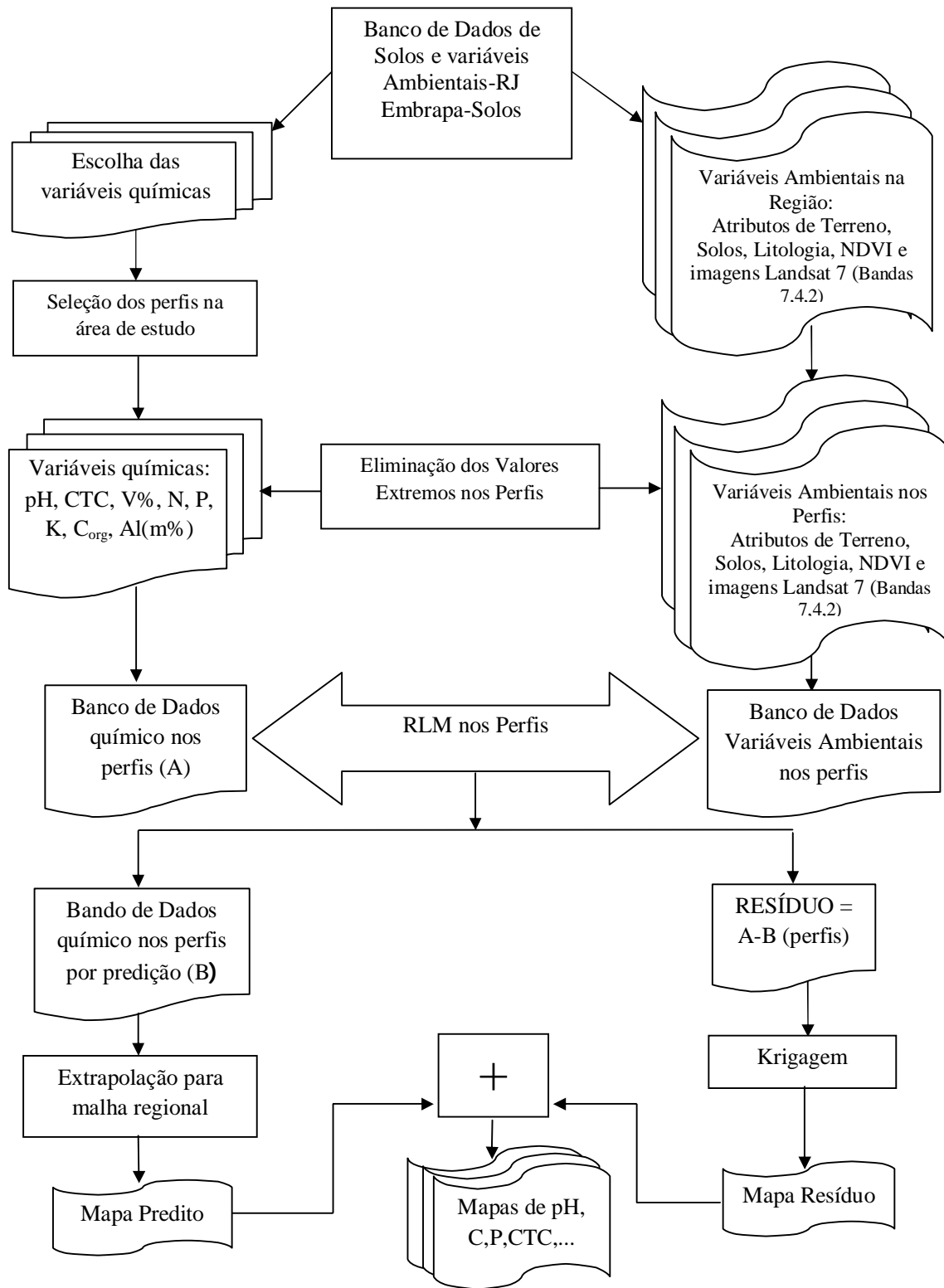


Figura 3.2.3: Fluxograma das etapas da pesquisa.

ID	X	Y	pH_agua	CTC	C	K+	V	Al+3	N	P	elevacao	aspecto	plano_curv	perfil_curv	declividade	umidade
86	810774.567	7528256.56	3,7	39,6	•	0,31	4	•	4,8	6	2,708050	90	0	0,70700002	0,55599999	18,77599
87	813500.647	7535591.14	4,2	11	19	0,23	11	3,1	2	9	3,401197	143	2,375	3,43099999	5,55600023	7,197000
88	814070.512	7521262.57	4,7	6,8	14,4	0,04	38	0,2	1,4	2	3,912023	66	-0,117	2,60400009	6,71299982	9,187000
117	815775.251	7606666.04	5,3	9	11,4	•	61	0,1	1,3	1	4,682131	273	-1,284	-3,0350001	18,3670006	7,374000
95	815872.624	7525382.56	4,9	8,4	18,4	•	43	0,2	1,3	2	3,332204	106	-0,411	2,69499993	12,1339998	7,636000

Figura 3.2.4: Exemplo do banco de dados das variáveis químicas de fertilidade mais dados de variáveis ambientais nos pontos amostrais.

	X	Y	elevacao	aspecto	plano_curv	perfil_curv	umidade	declividade	ndvi	argissolo	cambissolo	espodossolo	gleissolo	latossolo	neossolo	organossolo	gnaisse	granulitos
1	781615	7529655	1636	171	0,87900001	-5,671	5,1500001	86,973999	158	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2	781615	7529745	1700	173	8,5369997	13,7729998	4,69899988	81,6520004	255	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	781705	7529565	1544	174	19,9839993	33,382	5,96000004	44,2389984	255	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	781705	7529655	1619	163	-3,3929999	-11,144	5,26800013	76,5660019	127	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	781705	7529745	1682	146	11,6619997	5,41699982	4,81599998	80,1389999	183	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Figura 3.2.5: Exemplo do banco de dados das variáveis ambientais para toda a região.

3.2.1 _ Análise exploratória e identificação de valores extremos

Uma vez que os dados de fertilidade (camada de 0-10 cm) organizados e sistematizados, realizou-se a análise exploratória dos dados com auxílio do programa STATISTICA 7.0 (Statsoft, 2009). Ela foi importante para a identificação de valores extremos, que podem influenciar de maneira equivocada na análise dos dados, principalmente em regiões que possuem intensa atividade agrícola, pela adição de fertilizantes. Foram identificados: médias, medianas, erro padrão e assimetria dos dados de cada região. Além do sumário estatístico do banco de dados, foi realizada a identificação e análise de valores extremos, com análise da distribuição das variáveis no gráfico box-plot. Tukey (1977) sugeriu um método gráfico de *box-plot* para a identificação de *outliers*: nele se definem os “limites interiores” e “limites exteriores” (Schwertman e Silva, 2007) de uma tendência central do conjunto de dados (por exemplo, a média ou a mediana), de variáveis simples ou múltiplas. Uma estatística de dispersão, (por exemplo, erro padrão ou desvio padrão) define os limites do *box*, respectivamente, o primeiro e o terceiro quartis. *Outliers* e valores extremos podem ser assim identificados, de acordo com critérios estabelecidos *a priori*. Usando o método de Tukey (op. cit.) o intervalo interquartilico (IQR, em inglês), referido como H, é a diferença entre os valores numéricos que compõem o *box* do gráfico. Assim, são considerados *outliers* os valores maiores que 1,5H e como extremos ou aberrantes, os valores maiores que 3H. Além da análise exploratória dos dados de fertilidade, foi realizada uma análise das variáveis ambientais no programa *JUMP*® 6.0, através da correlação das variáveis de cada região com análise de histograma e estatística descritiva, onde também foram identificados alguns valores discrepantes em algumas das variáveis nas três regiões.

3.2.2_ Regressão Linear Múltipla (Regressão – Krigagem)

Como está apresentado na figura 3.2.2, após a análise exploratória dos dados de fertilidade e das variáveis ambientais a modelagem e predição de propriedades de solos foram elaboradas através de regressão múltipla no programa *JUMP*® 6.0, utilizando a opção *Analyzer* na ferramenta *Fit Model* no modo *stepwise*. A plataforma *stepwise* permite pesquisar através de modelos, e, com diversas combinações, escolher o modelo desejado. Para isto, esta plataforma

nos permite analisar diversos parâmetros estatísticos. Este sistema seleciona preditores mais significativos de forma interativa (Cook and Weisberg, 1999). Os parâmetros estatísticos analisados para avaliação dos modelos foram: RMSE (Raiz quadrada do erro médio), AIC (Critério de Informação de Akaike), Cp, R ajustado, F e a probabilidade de F.

O RMSE é uma medida do erro total de predição. É a Estimativa do Desvio Padrão do Erro Residual. O RMSE deve ser pequeno para uma previsão imparcial e precisa (Odeh, et al. 1995b). Os valores de RMSE foram utilizados para a avaliação da qualidade e precisão do ajuste. Ele é definido por (Equação 3.2.1):

Eq. 3.2.1

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-m} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-m}}$$

Onde:

n = número de amostras;

m = número de amostras usadas para predição;

$\hat{y}_i - y_i$ = valores das propriedades do solo preditos e medidos, respectivamente.

Esta distância é uma medida de discrepância o modelo atual e o modelo predito (Kullback e Leibler, 1951). Akaike (1983) relacionou a distância de Kullback e Leibler com a Máxima Verossimilhança, surgindo assim o AIC. O AIC é dado pela seguinte fórmula (Equação 3.2.2):

$$(3.2.2) \quad AIC = -2 \ln L + 2 K$$

Onde L é a Verossimilhança Maximizada² do modelo candidato e K é o número de parâmetros deste modelo. O AIC é um teste de escolha entre modelos, a qual é realizada

² O método de máxima verossimilhança é um método geral de estimar os parâmetros de uma população por valores que maximizam a probabilidade (L) de uma amostra. A probabilidade (ou verossimilhança) L de uma amostra de n observações x_1, x_2, \dots, x_n , é a função de probabilidade conjunta $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$, quando x_1, x_2, \dots, x_n são variáveis aleatórias discretas. Se x_1, x_2, \dots, x_n são variáveis aleatórias contínuas, então a probabilidade L de uma amostra de n observações, x_1, x_2, \dots, x_n , é a função densidade conjunta $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Seja L a probabilidade de uma amostra, onde L é uma função dos parâmetros Q_1, Q_2, \dots, Q_k . Então, os estimadores de máxima verossimilhança de Q_1, Q_2, \dots, Q_k são os valores de Q_1, Q_2, \dots, Q_k que maximizam L (Statsoft, 2009).

considerando que o modelo que apresenta o menor AIC é o melhor (Odeh, et al. 1995a; Akaike, 1983). Segundo Diggle e Ribeiro Júnior (2007) quanto menor o AIC, maior a exatidão do ajuste, e, se a diferença entre os valores AIC dos modelos for menor que 2, não há diferença estatística entre estes modelos.

O critério C_p de Mallows é uma medida alternativa de erro usada em regressão *stepwise*, e auxilia a avaliar se o número de variáveis preditoras é adequado em relação ao número de variáveis candidatas, definida como (Equação 3.2.3):

Equação (3.2.3):

$$C_p = (SEE_p/MSE_m) - (n-2p)$$

Onde:

n = número de observações

p = número de variáveis preditoras incluídas no modelo

m = número total de variáveis candidatas a preditoras

$SEE_p = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{ip})^2$ = soma dos quadrados dos erros para o modelo com p variáveis.

MSE = erro quadrático residual após a regressão com o conjunto completo de m variáveis.

Para modelos com um ajuste refinado, o C_p se aproxima do número de variáveis preditoras. É usado como uma ajuda na escolha entre modelos de regressão múltipla (Mallows, 1964). Segundo Montgomery e Runger (2003), em geral é importante optar por modelos em que o C_p de Mallows é pequeno e próximo de p . Um valor baixo de C_p indica que o modelo é relativamente preciso e possui variância pequena, na estimativa dos coeficientes da regressão e na previsão de respostas futuras. Assim como modelos com baixa capacidade preditiva têm valor de C_p maior do que p .

O Coeficiente de Determinação (R^2) expressa a quantidade da variação total explicada pela regressão. Uma estatística adicional do R-quadrado chamada de R-quadrado ajustado é calculada para expressar a tendência que induziria o R-quadrado a manter-se crescente quando as variáveis independentes são adicionadas à regressão. O R-quadrado ajustado torna-se menor, a medida que haja menos observações por variável independente. Quanto maior o valor deste

parâmetro, maior o poder de explicação da equação de regressão, e, portanto, melhor a previsão da variável dependente.

O valor de **F** calculado também foi utilizado como um dos parâmetros estatísticos na determinação do melhor modelo. Por esse critério, quanto maior o valor de **F**, melhor o ajuste do modelo. O Valor **F** é a relação da variância das médias com a variância do erro. Quanto menor a probabilidade de **F** ser igual a zero, mais significativo é seu valor numérico e assim é melhor o modelo (Andrews, 1973).

Foram testados dois modelos, M1 (modelo 1, com valores extremos) e M2, (modelo 2, sem valores extremos) para a predição de cada variável de fertilidade.

O modelo que apresentar menor valor de AIC, RMSE, Cp e maior R-quadrado ajustado será utilizado para a predição final e mapeamento das propriedades de fertilidade do solo (Webster e McBratney, 1989).

Após a obtenção do melhor ajuste por RLM utilizando os pontos amostrais, é necessário somar o valor predito (calculado com a fórmula da predição) com a krigagem dos resíduos (resultante da regressão) do modelo (Figura 3.2.3), afim de obter um melhor ajuste do modelo.

Para realizar o processo de krigagem dos resíduos da estimativa do modelo, utilizou-se o programa Vesper³ (*Variogram Estimation and Spatial Prediction with Error*), 1.6 Interface4. Testaram-se as opções de semi-variogramas exponencial, esférico e gaussiano.

Os resultados das krigagens dos resíduos da estimativa do modelo foram inseridos na base de dados auxiliares e somados com o valor predito para, enfim, obter-se o modelo final (regressão-krigagem) das variáveis químicas estudadas, pH em água, C, P, K⁺, CTC, V% e Al(m) (Figura 3.2.2).

3.2.3_ Mapeamento digital das variáveis indicadoras da fertilidade natural

Para espacializar o modelo é necessário converter os valores do atributo desejado, para o formato *dbf*. Uma vez exportado o arquivo para *dbf*, pode ser lido em qualquer SIG (Sistema de Informação Geográfica). Neste caso foi utilizado o programa ArcGIS 9.3.1.

³ Desenvolvido pela Universidade de Sydney (McMillan, 2006).

Na produção dos mapas (especialização) foi usada a projeção WGS1984 23S⁴. O arquivo gerado pela ferramenta é um arquivo vetorial de pontos temporário (arquivo *events*). Após criar o arquivo *events* no ArcMap é necessário salvar este para o formato *shapefile*. Neste *shapefile* de pontos criado, cada um destes pontos contém uma coordenada vinda do banco de dados das variáveis ambientais. Ainda no ArcGis 9.3.1 este arquivo *shapefile* deve ser transformado em *raster*.

Para a criação das legendas no mapa as classes das distribuições de frequência de cada mapa, de acordo com a distribuição da ocorrência das características do terreno a partir do método de aproximação denominado “rupturas naturais” (em inglês “natural breaks”) identificáveis no histograma de frequência dos mapas correspondentes. Este método ajusta os limites das classes de acordo com a quebra na distribuição da frequência dos dados. Este método encontra agrupamentos e padrões inerentes aos dados, diferenciando áreas entre si (Jenks,1963). Então foram criadas três classes para cada um dos planos de informação das variáveis preditas pelo RLM. Estas classes foram classificadas em baixa, média e alta fertilidade, respeitando os dados adquiridos nos modelos RLM. Mas, foi realizado um embasamento teórico para a discussão desses dados com referências da literatura (Tabela 3.2.1).

⁴ O Sistema Geodésico Mundial (WGS) é um padrão para uso em cartografia, geodésia e navegação. É um elipsóide de referência de origem geocêntrica.

Tabela 3.2.1: Faixas das variáveis químicas para a fertilidade dos solos pelos autores citados.

Autores Variáveis Químicas	Baixo	Médio	Bom	Autores
pH em água	5,0 <	5,0 – 6,0	6,0 – 6,5	Raij (1991) Malavolta (1980)
Fósforo (P) (mg/kg)	0 - 10	11,0 - 20,0	≥ 21,0	Almeida et al (1988)
Carbono (C) (gk/g)	4,1 – 11,6	11,7 – 23,2	≥ 23,3	Tomé Jr. (1997)
Potássio (K) (cmol_c.kg)	0 – 0,11	0,11 – 0,23	> 0,23	Almeida et al (1988)
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)(cmol_c.kg)	0,61- 4,30	4,31-8,60	≥ 8,61	Souza e Lobato (2004) Tomé Jr. (1997)
Saturação por Alumínio (m) %	15 - 30	30 - 50	< 15,0	Tomé Jr. (1997)
Saturação por Base (V%)	20,1-40	40,1-60	≥ 60,0	Souza e Lobato (2004) Tomé Jr. (1997)

4. Resultados e Discussão

4.1- Análise descritiva e exploratória das variáveis químicas indicadoras de fertilidade natural dos solos.

Os dados de atributos químicos dos solos foram submetidos a uma análise exploratória para a identificação de possíveis valores *outliers* e extremos, de maneira a não se “mascarar” os verdadeiros valores de fertilidade natural dos solos, como é o caso para áreas que recebem altas doses de fertilizantes. Os resultados descritos dessas análises são apresentados por região.

Região Norte

O sumário estatístico das variáveis: pH em água, P_{ass} (mg.kg), K^+ (cmol_c.kg), C (g/kg), CTC(cmol_c.kg), V% e Al(m)%, da camada de 0-10 cm, para a região Norte está apresentado na tabela 4.1.1. As variáveis que habitualmente são incorporadas como corretivos de fertilidade P(mg.kg), K^+ (cmol_c.kg) e C(g/kg) estão nitidamente influenciadas pela adição antrópica, notadamente nesta região, onde a cana-de-açúcar tem cultivo expressivo. Essas variáveis têm valor de assimetria muito maior que 0,5. Wojciechowski (2006) verificou em seu estudo, relacionado às características das variáveis físico-químicas em solos de floresta, que a distribuição do conjunto de dados após a retirada de valores discrepantes deixou o seu novo banco de dados mais homogêneo, indicando que os dados apresentaram valores de maior aproximação entre médias e medianas. Este mesmo fato foi observado no banco de dados deste estudo, onde houve uma aproximação entre médias e medianas principalmente entre as variáveis P(mg.kg), C(g/kg) e K^+ (cmol_c.kg).

No conjunto de dados da região foram identificados nove valores extremos do atributo químico fósforo, nove pontos extremos de potássio, seis pontos de carbono, seis pontos de capacidade de troca catiônica e três pontos extremos de saturação por alumínio (Tabela 4.1.1). Com a retirada desses valores houve uma melhor distribuição dos valores no histograma e uma melhor uniformização dos dados.

Assim, as figuras 4.1.1a e 4.1.1b, apresentam os gráficos box-plot das variáveis, antes e após a retirada dos valores considerados extremos. Conforme Frizzo et al. (2007), através dos valores obtidos da frequência acumulada, são identificados valores correspondentes a diferentes quartis observados nas representações box-plot. Na figura 4.1.1a, da região Norte, é nítida a modificação antrópica da fertilidade natural: fósforo e carbono, ao serem retirados os valores extremos do conjunto de amostras (Fig. 4.1.1b) mudam a escala do banco de dados. A partir dos gráficos “box-plot” dos dados, foram identificados e eliminados os valores extremos do banco de dados.

A análise dos histogramas apresentados nas figuras 4.1.2a e 4.1.3b, também deixa evidente a presença de valores extremos e com a retirada desses valores houve uma melhor simetria dos dados. A ocorrência dos valores discrepantes dos elementos C(g/kg), K⁺(cmol_c.kg) e P(mg.kg) fez com que o histograma de frequência (Figura 4.1.2) apresentasse assimetria mais à esquerda, no sentido dos teores mais baixos. O mesmo ocorreu com a variáveis químicas que foram analisadas por Chaves et al. (2004) em solos aluviais, em que as variáveis analisadas em sua maioria apresentaram assimetria desviada para esquerda devido a valores considerados extremos “mascarando” os valores considerados bons para as plantas.

Essas figuras (4.1.2a e 4.1.2b) apresentam, além dos histogramas de cada variável, a correlação de Pearson. O coeficiente de correlação de Pearson (r) detecta relações lineares entre duas variáveis. A figura 4.1.2b mostra as correlações após a retirada dos valores extremos e que as maiores correlações estão entre as variáveis pH e V% (0,81) e pH com Al(m)% (-0,65). CTC (cmol_c.kg) com C (0,60) indicando origem orgânica, esta região possui ambientes deposicionais, a Baixada Campista, como brejos e lagoas. Este resultado também foi encontrado por Abreu Jr. et al (2003) na região de São Paulo em solos com características bastante ácidas, onde foi encontrado correlações positivas entre pH e V% e negativamente com pH e Al(m)%.

Tabela 4.1.1. Resumo Estatístico das variáveis na região Norte, na camada de 0-10 cm, a) com valores extremos e b) sem valores extremos (N = número de amostras)

Resumo Estatístico	a)Região Norte com valores extremos (0-10cm)							b)Região Norte sem valores extremos (0-10cm)						
	pH água	P (mg. kg)	C (g/kg)	K+ (cmolc .kg)	CTC (cmolc.kg)	Al (m%)	V (%)	pH água	P (mg. kg ⁻¹)	C (g/kg)	K+ (cmolc . kg)	CTC (cmolc.kg)	Al (m %)	V (%)
Média	5,10	16,00	23,20	0,32	16,00	7,64	43,00	5,10	4,00	18,50	0,21	12,80	6,09	43,00
Mediana	4,90	3,00	15,60	0,15	9,40	5,08	41,00	4,90	3,00	15,10	0,13	9,20	5,75	41,00
Moda	5,00	2,00	6,50	0,11	6,20	0,00	25,00	5,00	2,00	6,50	0,11	6,20	0,00	25,00
Erro Padrão	0,10	4,00	2,80	0,04	1,80	0,75	2,00	0,10	0,40	1,20	0,02	0,90	0,70	2,00
Assimetria	0,70	7,00	6,40	3,29	4,00	0,89	0,00	0,70	2,10	1,80	1,94	1,50	0,70	0,00
N	133	133	133	133	133	133	133	133	124	127	124	127	130	133

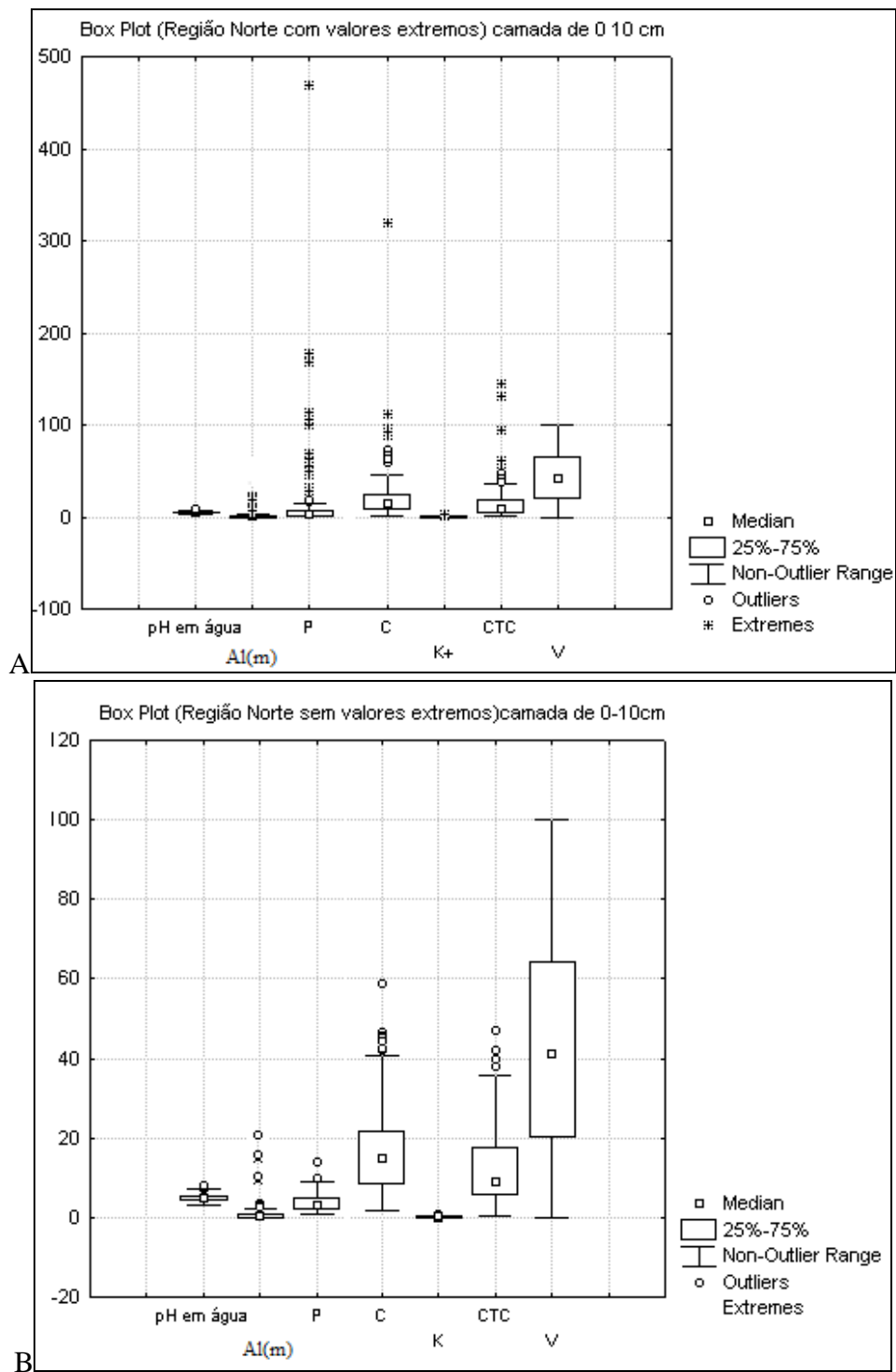


Figura 4.1.1: Box-Plot região Norte, na camada de 0-10cm. Antes (4.1.1a) e após (4.1.1b) a retirada de valores extremos.

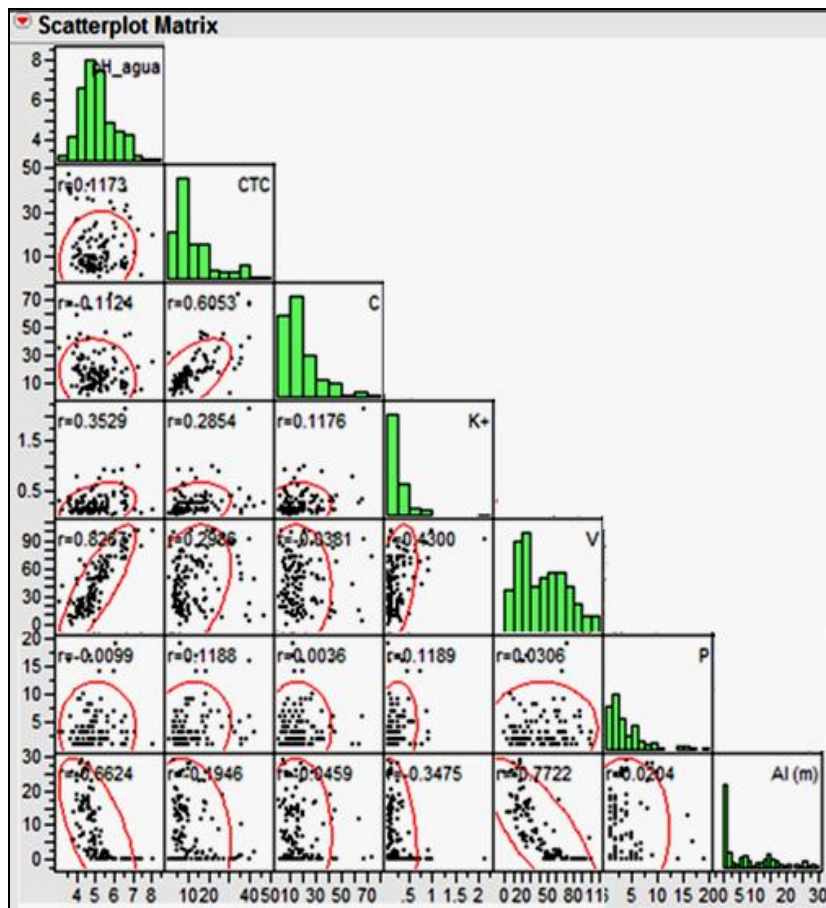


Figura: 4.1.2a: Região Norte: histogramas e correlações de Pearson antes da retirada de valores discrepantes apresentando a distribuição de valores no conjunto de

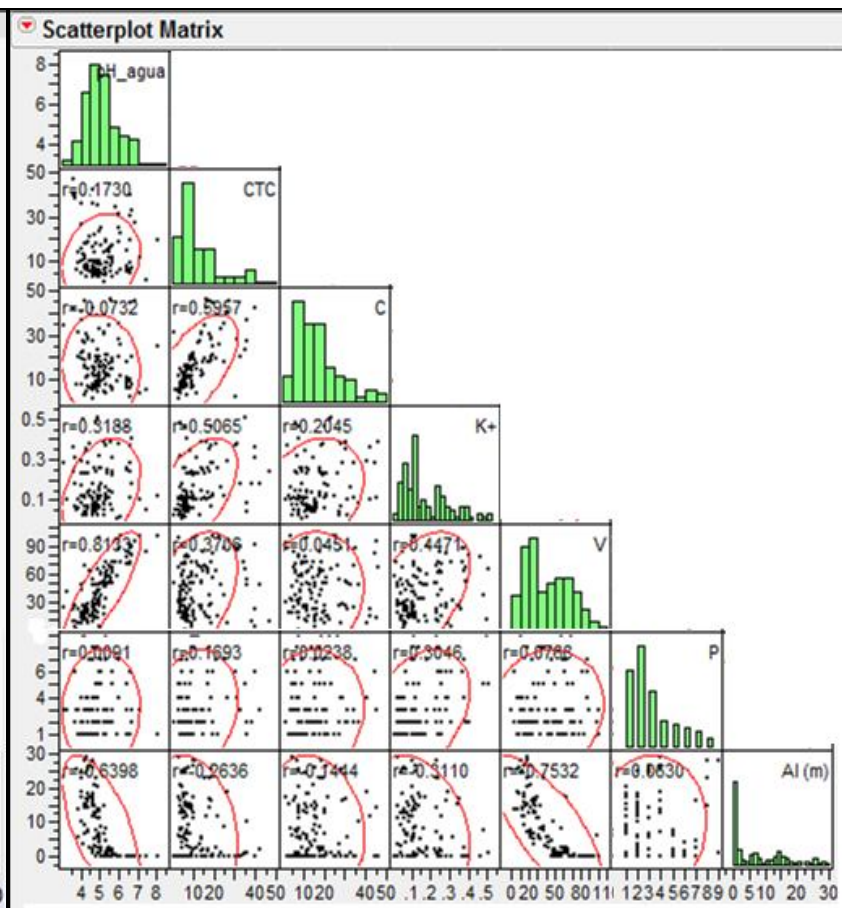


Figura: 4.1.2b: Região Norte: Histogramas de correlação de Pearson após a retirada de valores extremos mostrando a distribuição do conjunto do banco de dados de fertilidade mais próximo da normal.

Região Noroeste

O sumário estatístico das variáveis: pH em água, P_{ass} (mg.kg), K^+ (cmol_c.kg), C(g/kg), CTC(cmol_c.kg), V% e Al(m)%, da camada de 0-10 cm para região Noroeste, está apresentado na tabela 4.1.2. As variáveis P(mg. kg), K^+ e C(g/kg), CTC(cmol_c.kg⁻¹) e Al(m)% sofreram retiradas de valores extremos. As variáveis P(mg.kg) e K^+ (cmol_c.kg) estão nitidamente influenciadas pela adição antrópica provavelmente por práticas agrícolas. A região Noroeste possui uma produção de tomate (81.312 kg/ha) bastante considerável em relação às demais culturas (CIDE, 2005). Como o tomate é uma cultura extremamente exigente em adubação e calagem, devido à elevada incidência de pragas e doenças, é provável o uso indiscriminado de agroquímicos (Macedo, et al. 2005). Apenas as variáveis pH e V% podem ser consideradas com distribuição normal, com base nos valores de média e mediana (Tabela 4.1.2). Cambardella et al. (1994) ressalta que quando os valores da média, mediana e moda apresentam valores semelhantes e que os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal, isto pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição.

No conjunto de dados da região, foram identificados sete pontos extremos do atributo químico de P(mg.kg), três pontos extremos de potássio, um ponto de carbono, um ponto de capacidade de troca catiônica e três pontos extremos de saturação por alumínio (Tabela 4.1.2). Com a retirada desses valores houve uma melhor distribuição dos valores no histograma e uma melhor uniformização dos dados.

Assim, a figura 4.1.3a apresenta os gráficos box-plot das variáveis com a presença de valores extremos. A figura 4.1.3b apresenta a distribuição das variáveis após a retirada dos valores considerados extremos. Essas observações também podem ser analisadas na tabela 4.1.2 com uma maior distância entre os valores de média e mediana antes da retirada dos valores extremos. Weirich Neto, et al (2006) em seu estudo de necessidades de fertilizantes em plantio direto, identificaram, com o uso de gráfico box-plot, a presença de valores extremos nas variáveis P(mg.kg) e K^+ (cmol_c.kg). Segundo os autores, a retirada desses valores possibilitou uma melhor análise geoestatística. Esse mesmo fato foi também observado nos gráficos box-plot, onde a variável P(mg.kg) mostrou um maior número de valores extremos.

Tabela 4.1.2. Resumo Estatístico das variáveis na região Noroeste, na camada de 0-10 cm,
a) com valores extremos e b) sem valores extremos (N = número de amostras)

Resumo Estatístico	Região Noroeste com valores extremos (0-10cm)							Região Noroeste sem valores extremos (0-10cm)						
	pH água	P (mg. kg)	C (g/kg)	K+ (cmolc . kg)	CTC (cmolc.kg)	Al (m%)	V (%)	pH água	P (mg. kg)	C (cmolc . kg)	K+ (cmolc . kg)	CTC (cmolc.kg)	Al (m%)	V (%)
Média	5,86	6,39	13,96	0,26	8,98	1,00	61,43	5,86	1,81	12,11	0,19	8,46	0,35	61,43
Mediana	5,90	2,00	11,45	0,15	7,60	0,00	63,50	5,90	1,00	11,30	0,14	7,60	0,30	63,50
Moda	6,10	1,00	9,80	0,08	5,00	0,00	39,00	6,10	1,00	9,80	0,08	5,00	0,00	39,00
Erro Padrão	0,09	2,28	2,04	0,04	0,80	0,63	3,06	0,09	0,20	0,90	0,02	0,63	0,13	3,06
Assimetria	-0,30	4,40	5,05	2,34	2,32	5,67	-0,61	-0,30	1,97	1,64	1,55	1,61	1,94	-0,60
N	45	45	45	45	45	45	45	45	38	44	42	44	42	45

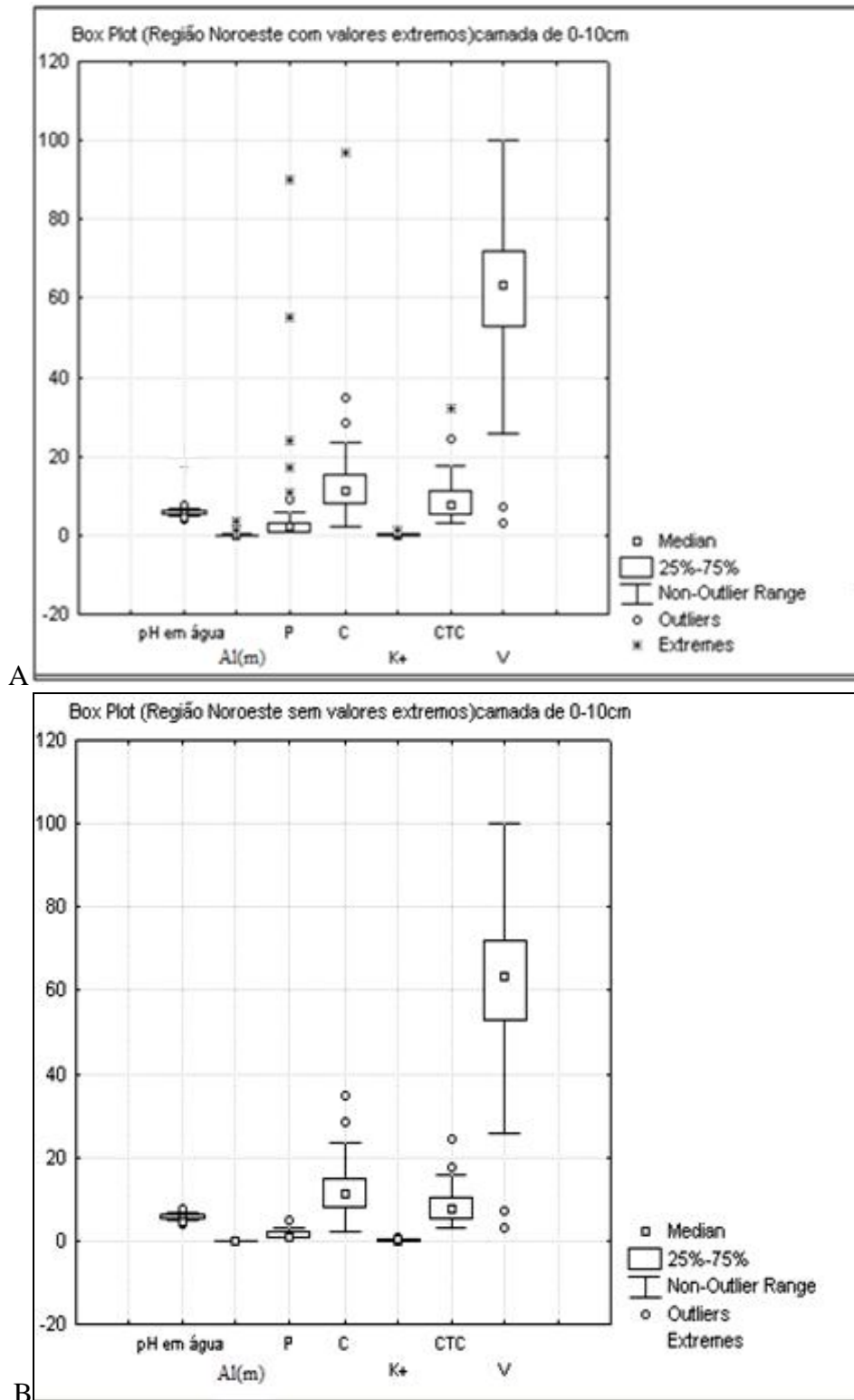


Figura 4.1.3: Box-Plot região Noroeste, na camada de 0-10cm. Antes (4.1.3a) e após (4.1.3b) a retirada de valores extremos.

A análise dos histogramas apresentados nas figuras 4.1.4a e 4.1.4b, também deixa evidente a presença de valores extremos, os quais, em geral, apresentaram assimetria à esquerda, tendo sido mais acentuada para CTC (cmol_c.kg) e K⁺(cmol_c.kg). A retirada dos valores discrepantes dos elementos CTC (cmol_c.kg), C(g/kg), K⁺(cmol_c.kg), P(mg.kg) e Al(m)% fez com que o histograma de frequência (Figura 4.1.6) apresentasse o conjunto de dados mais homogêneo. As variáveis pH e V% apresentaram um conjunto de dados mais próximo da normal, em relação às demais variáveis, como se vê nas figuras 4.1.4a e 4.1.4b. Silva et al (2003) encontrou em seu estudo grandes diferenças de potássio trocável entre os valores de média aritmética, mediana e moda em Argissolo Vermelho-Amarelo, indicando valores extremos em seu banco de dados. Esse resultado corrobora os deste estudo, não só com a variável K⁺(cmol_c.kg), mas com P, CTC (cmol_c.kg), C(g/kg) e Al(m)%, em tipo de solos semelhantes.

A figura 4.1.4b mostra as correlações após a retirada dos valores e pode-se observar que a maioria das correlações são positivas e que as maiores correlações estão entre as variáveis pH e V% (0,79). As maiores correlações negativas ocorreram com pH e Al(m) (-0,55). Tanto na região Norte como na região Noroeste, pode-se verificar a variável pH apresentando maiores correlações com valor V% . A correlação entre pH e V% nos solos pode estar ligada, principalmente, ao fato de que mudanças no pH estão associadas a calagem. Além de diminuir a acidez ativa (pH), potencial (H+Al) e trocável (Al), fornece cátions trocáveis (Ca e Mg) para o solo, aumentando, assim, a soma de bases e, conseqüentemente, a saturação por bases (Raij, et al. 1968).

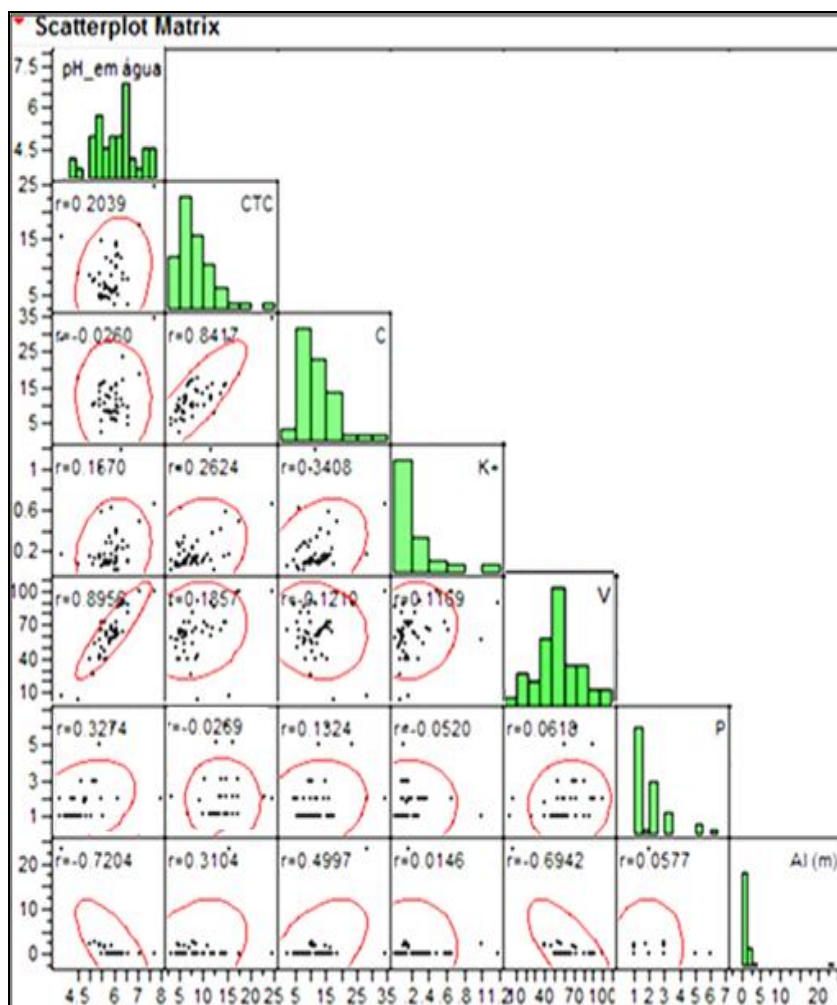


Figura: 4.1.4a: Região Noroeste: histogramas e correlação de Pearson antes a retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.

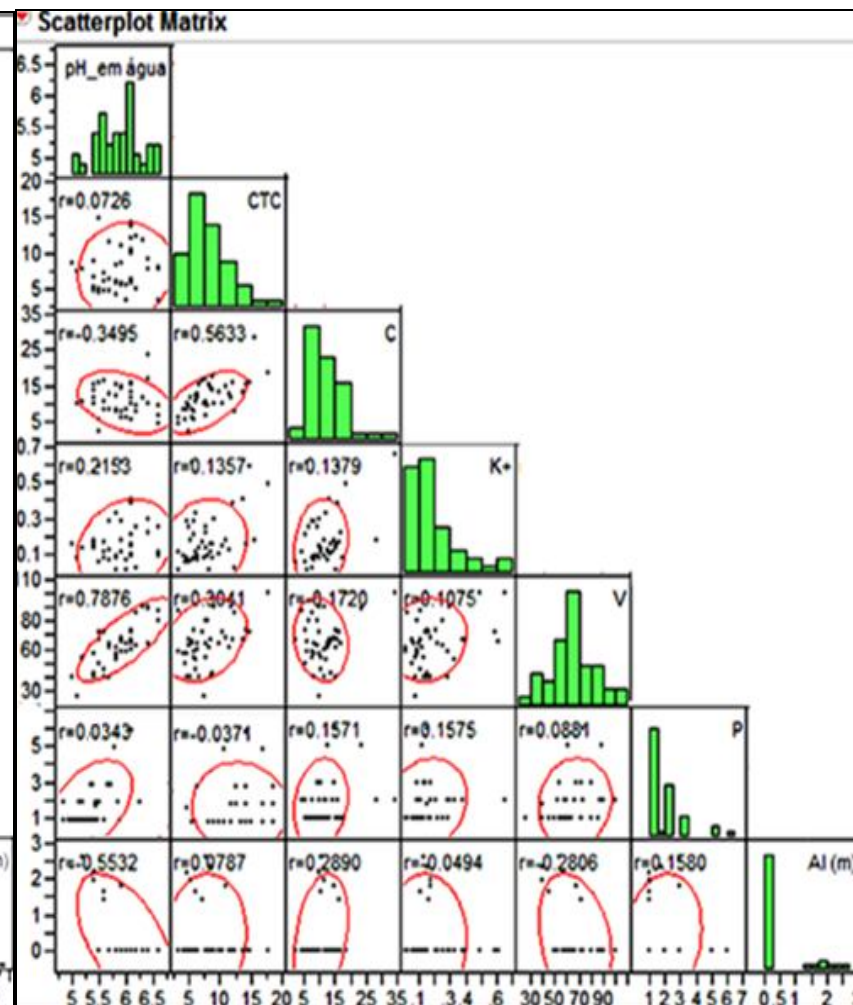


Figura: 4.1.4b: Região Noroeste: histogramas e correlação de Pearson após a retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.

Região Serrana

O sumário estatístico das variáveis: pH em água, P_{ass} (mg.kg), C(g/kg), K^+ (cmol_c.kg), CTC(cmol_c.kg), Al(m) e V%, da camada de 0-10 cm para a região Serrana, está apresentado na tabela 4.1.3. As variáveis pH, CTC(cmol_c.kg) e V(%) tem distribuição aproximadamente simétrica, exibindo valores de média e mediana bem próximos. As variáveis P(mg.kg), K^+ (cmol_c.kg) e Al(m)% apresentam, além da distância entre médias e medianas, a assimetria bastante desviada para a esquerda as duas primeiras, possivelmente, influenciadas pela adição de fertilizantes. A região possui expressivo cultivo de hortaliças, o que pode estar influenciando P(mg.kg) e K^+ (cmol_c.kg) com adição de fertilizantes. Segundo Trani e Raji (1997) o uso de fertilizantes à base de potássio deve ser utilizado de forma adequada para que não ocorra perda de produtividade.

No conjunto de dados da região Serrana foram identificados oito pontos de valores extremos do atributo químico fósforo, quatro pontos extremos de potássio, dois pontos de carbono e quatro pontos extremos de saturação por alumínio (Tabela 4.1.3). Com a retirada desses valores houve uma melhor distribuição dos valores no histograma e uma melhor uniformização dos dados.

Assim, a figura 4.1.5a apresenta os gráficos box-plot das variáveis com a presença de valores extremos. A figura 4.1.5b apresenta a distribuição das variáveis após a retirada dos valores considerados extremos. Essas observações também podem ser analisadas na tabela 4.1.3 com uma maior distância entre os valores de média e mediana antes da retirada dos valores extremos, principalmente na variável Al(m)%. Os valores extremos superestimavam a média da variável Al(m)% o que seria bastante prejudicial nas predições sobre a fertilidade do solo. Os altos valores de saturação por alumínio prejudicam o desenvolvimento radicular, reduzindo absorção de água e de nutrientes pelas plantas. Os efeitos negativos de altos níveis de Al no crescimento das plantas têm sido uma preocupação para a agricultura (Matsumoto, 2000).

Tabela 4.1.3. Resumo Estatístico das variáveis na região Serrana, na camada de 0-10 cm,
a) com valores extremos e b) sem valores extremos (N = número de amostras)

Resumo Estatístico	Região Serrana com valores extremos (0-10cm)							Região Serrana sem valores extremos (0-10cm)						
	pH água	P (mg. kg)	C (g/kg)	K+ (cmolc . kg)	CTC (cmolc.kg)	Al (m%)	V (%)	pH água	P (mg. kg)	C (g/kg)	K+ (cmolc . kg)	CTC (cmolc.kg)	Al (m%)	V (%)
Média	5,53	1,54	15,79	0,17	8,76	18,82	41,06	5,53	1,00	14,60	0,13	8,76	13,34	41,06
Mediana	5,40	1,00	14,80	0,11	8,60	14,48	38,00	5,40	1,00	14,65	0,11	8,60	12,35	38,00
Moda	5,90	1,00	17,10	0,11	12,60	10,00	78,00	5,80	1,00	17,10	0,11	12,60	10,00	78,00
Erro Padrão	0,09	0,32	1,17	0,03	0,44	1,92	4,15	0,09	0,01	0,86	0,01	0,44	1,07	4,15
Assimetria	0,38	5,61	1,73	4,51	0,06	3,76	0,24	0,38	0,01	0,55	0,93	0,06	0,77	0,24
N	50	50	50	50	50	50	50	50	42	48	46	50	46	50

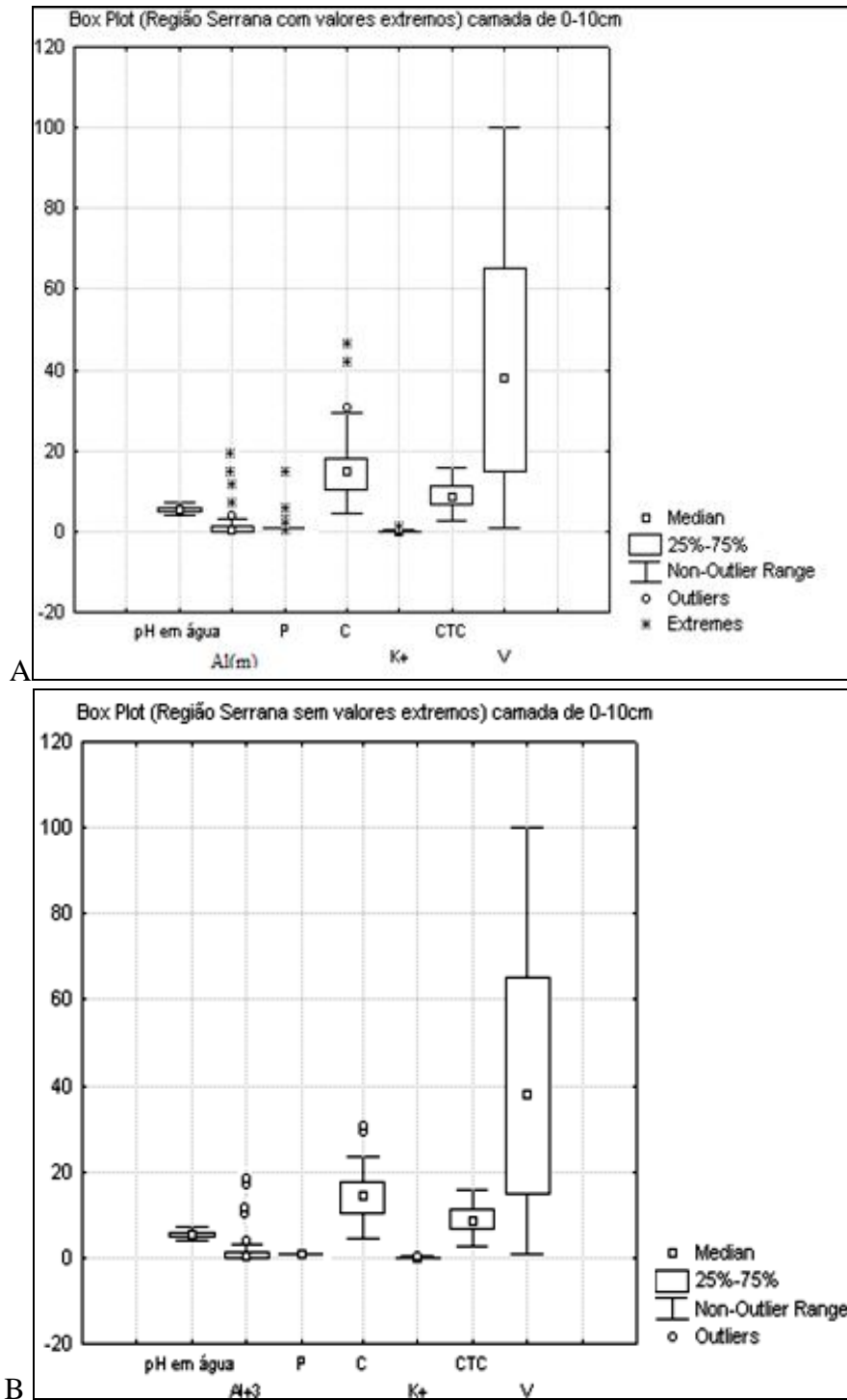


Figura 4.1.5: Box-Plot região Serrana, na camada de 0-10cm. Antes (4.1.5a) e após (4.1.5b) a retirada de valores extremos.

A análise dos histogramas apresentados nas figuras 4.1.6a e 4.1.6b, também deixa evidente a presença de valores extremos, os quais, em geral, apresentaram assimetria à esquerda, tendo sido mais acentuada para C(g/kg), K⁺(cmol_c.kg) e Al(m)%. A retirada dos valores discrepantes dos elementos C(g/kg), K⁺(cmol_c.kg) e Al(m)% fez com que o histograma de frequência (Figura 4.1.6b) apresentasse o conjunto de dados mais homogêneo, exceto para a variável P(mg.kg). A variável P(mg.kg), mesmo com a retirada de valores extremos, mantém uma distribuição concentrada no valor 1(mg.kg), indicando baixa resolução analítica. As variáveis pH, CTC(cmol_c.kg) e V% apresentaram um conjunto de dados mais próximo da normal, em relação às demais variáveis, como se vê nas figuras 4.1.6a e 4.1.6b.

A figura 4.1.6b ilustra as correlações após a retirada dos valores e pode-se observar que todas as correlações são positivas e que as maiores correlações estão entre as variáveis pH e V% (0,70), pH com Al(m) (0,77), V% com Al(m) (0,63) e CTC com C (0,78). Rezaei e Gilkes (2005) obtiveram uma forte relação positiva entre CTC e carbono orgânico em uma região semi-árida; segundo os autores, isto pode indicar que a primeira camada mais superficial (0-10 cm), rica em matéria orgânica pode proporcionar superfície e carga negativa para reter cátions trocáveis. Este resultado corrobora o presente estudo, onde a CTC(cmol_c.kg) obteve uma alta correlação com carbono orgânico.

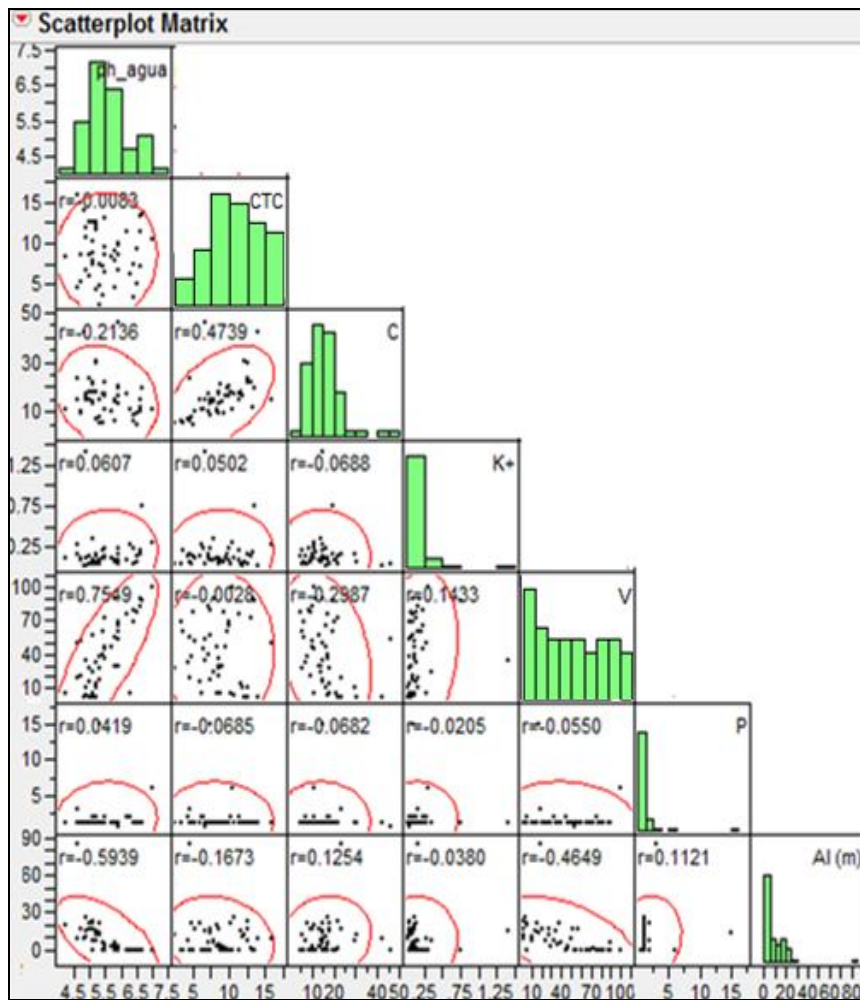


Figura: 4.1.6a: Região Serrana: histogramas e correlações de Pearson antes da retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.

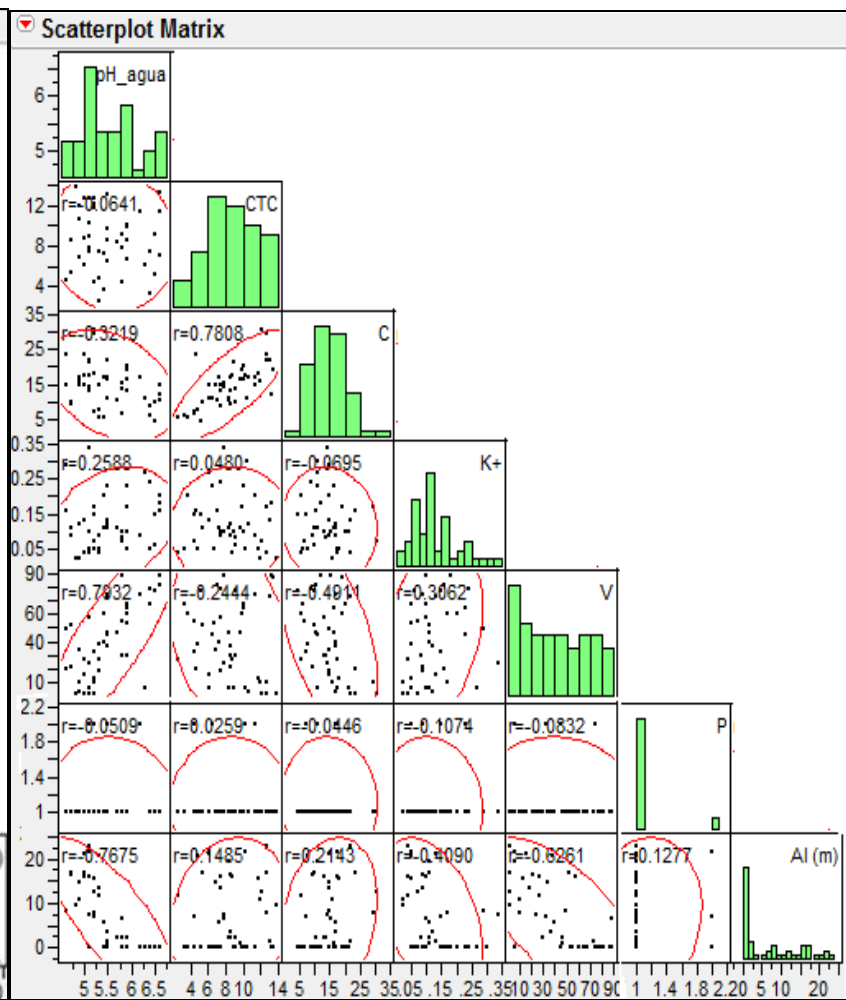


Figura: 4.1.6b: Região Serrana: histogramas e correlações de Pearson após a retirada de valores extremos mostrando os valores discrepantes neste conjunto do banco de dados de fertilidade.

As variáveis P(mg.kg), C(g/kg), K⁺(cmol_c.kg) e CTC(cmol_c.kg) apresentaram as maiores diferenças entre média, mediana e moda em todas as três regiões, sendo mais expressivo na região Norte. Na região Noroeste este fato foi mais expressivo com a variável P(mg.kg). Na região Serrana o Al(m)% foi o atributo que apresentou maior diferença entre as medidas centrais. A região que obteve maior retirada de valores extremos foi a região Norte, evidenciando intensa atividade agrícola nesta região.

Em todas as três regiões as maiores correlações entre atributos químicos foram entre pH e V%. Existe um alto grau de relação entre algumas variáveis do solo, por exemplo, a saturação por base é, naturalmente, positivamente relacionados com pH, este é um fato que pode ocorrer em muitos ambientes tropicais (Ameyan, 1988).

4.2 – Relações entre variáveis de fertilidade natural e variáveis ambientais

Região Norte

No conjunto de dados amostrais da região Norte, foram identificados dois valores discrepantes da variável Elevação, dois valores extremos da variável Plano de Curvatura, três da variável Perfil de Curvatura, e 1 ponto discrepante da variável Declividade. A retirada desses valores resultou em uma melhor distribuição dos valores no histograma e uma melhor uniformização dos dados (Figura 4.2.1).

As correlações de Pearson ($r \geq 0,13$, $P = < 0,20$) observadas entre as variáveis de fertilidade e as variáveis ambientais, na Figura 4.2.1, mostram que a variável química Carbono foi a que mais se correlacionou, de forma significativa e positiva. As maiores correlações de C(g/kg) foram: com Elevação (0,55), Declividade (0,28), Índice de Umidade (0,28), NDVI (0,21), B4(0,21) e B7 (0,20). Esses resultados para as correlações de carbono com variáveis ambientais indicam a utilidade do carbono orgânico como um indicador fiável e sensível à sustentabilidade do solo. Estas conclusões são apoiadas por (Herrick e Wander, 1998 e McIntosh, et al. 2000), e também são similares às encontradas por Tsui, et

al (2004). Estes autores encontraram uma correlação positiva, em uma profundidade de 5 – 15 cm, para o carbono orgânico com a Declividade. Esta correlação entre declividade e C orgânico pode estar relacionada ao acúmulo de matéria orgânica ao longo da declividade, que pode ser atribuída aos processos pedogenéticos relacionados a vegetação, bioturbação e acúmulo de água. O papel desses processos tem sido reconhecido por outros estudos (Schaetzl, 1990; Johnson et al., 2000).

A variável química CTC (cmol_c.kg) mostra uma correlação significativa e positiva com a variável ambiental Aspecto (0,55), o que também foi encontrado por Rezaei e Gilkes (2005) em uma paisagem semi-árida.

A variável Índice de Umidade também obteve correlações positivas e significativas com variáveis químicas do solo tais como: pH (0,29), CTC (0,50), C (0,28), K⁺ (0,37), V% (0,45) e Al(m) (0,47). A umidade do solo é um dos fatores que afetam o padrão espacial dos processos naturais, dentre eles a distribuição das propriedades dos solos (Fu e Rich, 1999). Sorensen (2009), encontrou melhores correlações de propriedades do solo com pH e Índice de Umidade, em solos podzólicos, em uma região da Suécia. Ainda segundo o mesmo autor (Sorensen, 2009), o Índice de Umidade possui boa correlação com as propriedades do solo; isso confirma um controle maior sobre a evolução dos solos, principalmente em regiões de solos mais jovens.

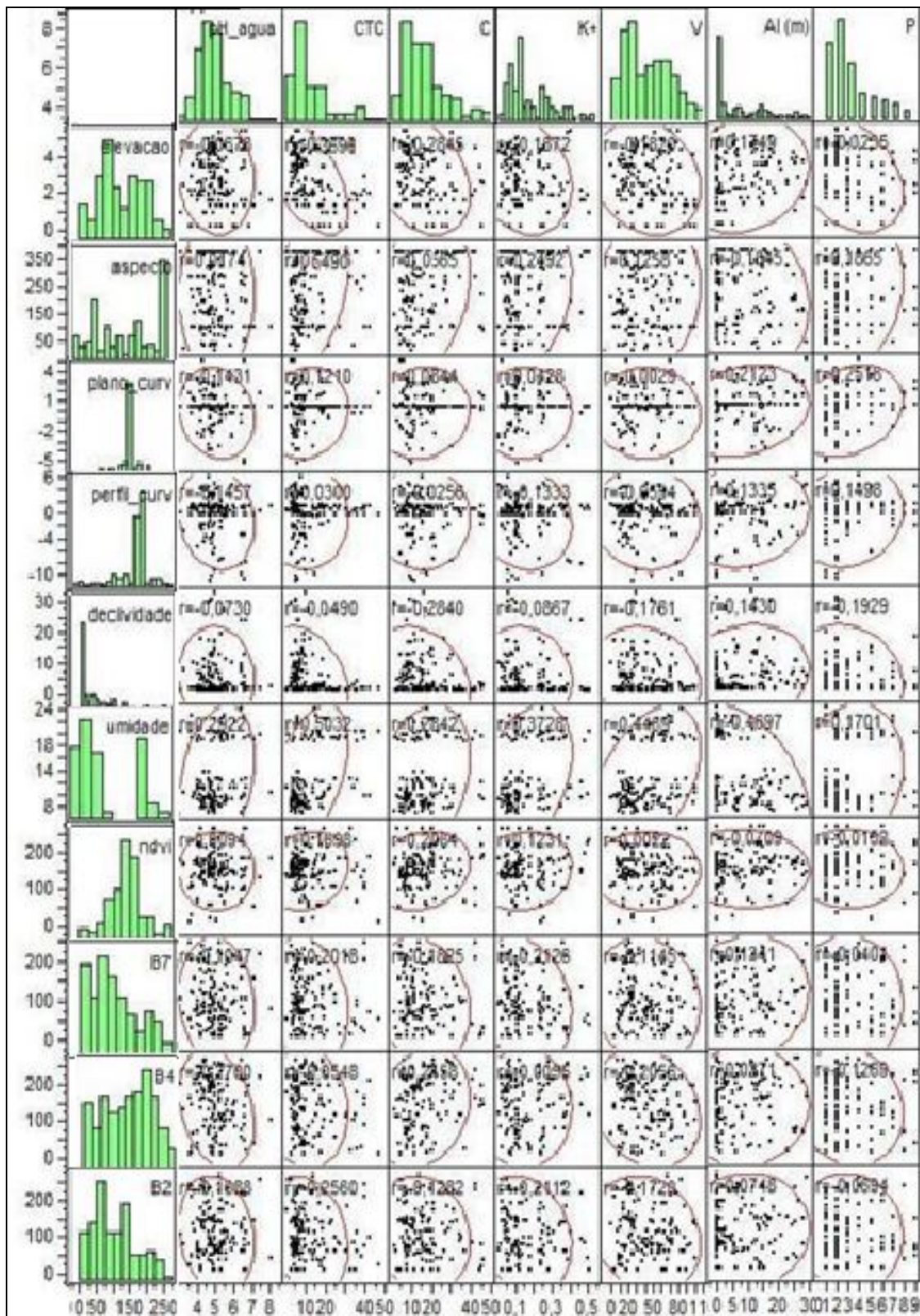


Figura 4.2.1: Correlação das variáveis de fertilidade e ambientais (sem valores extremos) da região Norte ($r > 0,13$ e $p \leq 0,20$).

Região Noroeste

No conjunto de dados da Região Noroeste foram observados três valores discrepantes na variável Índice de Umidade, dois pontos discrepantes na variável Elevação, e um na variável Plano de Curvatura e Índice de Umidade. Com a retirada destes pontos a distribuição ficou mais homogênea e simétrica (Figura 4.2.2).

Nas correlações de Pearson ($r \geq 0,23$, $P = < 0,20$) com as variáveis químicas e ambientais da região Noroeste, foi observado que a variável Elevação obteve correlações significativas e negativas com as variáveis químicas C (-0,53), K⁺ (-0,64), V% (-0,45) e obteve correlações significativas e positivas com pH (0,28) e P (0,28). A Declividade também apresentou significativas correlações negativas com K⁺ (-0,32), C (0,25) e P (-0,30). Correlações entre Elevação e K⁺(cmol_c.kg) apresentaram significativa e negativa correlação e Declividade com K⁺(cmol_c.kg) e Declividade com P(mg.kg) também apresentaram correlações significativas e negativas. Correlações negativas, entre Declividade e P(mg.kg), também foram encontradas por Kravchenko e Bullock (2000) em seu estudo na Índia.

Como já foi mencionado no Capítulo 3.1, esta região possui um relevo bastante movimentado com altitudes bem variadas e uma declividade bastante acentuada variando entre 15 a 20%, podendo atingir em algumas regiões 45%. Segundo Pennock e Jong (1990) a topografia pode afetar a produção agrícola de inúmeras maneiras, influenciando na redistribuição (erosão e / ou deposição) de partículas do solo, da matéria orgânica e dos nutrientes do solo, resultando em mudanças nas propriedades físicas e químicas dos solos.

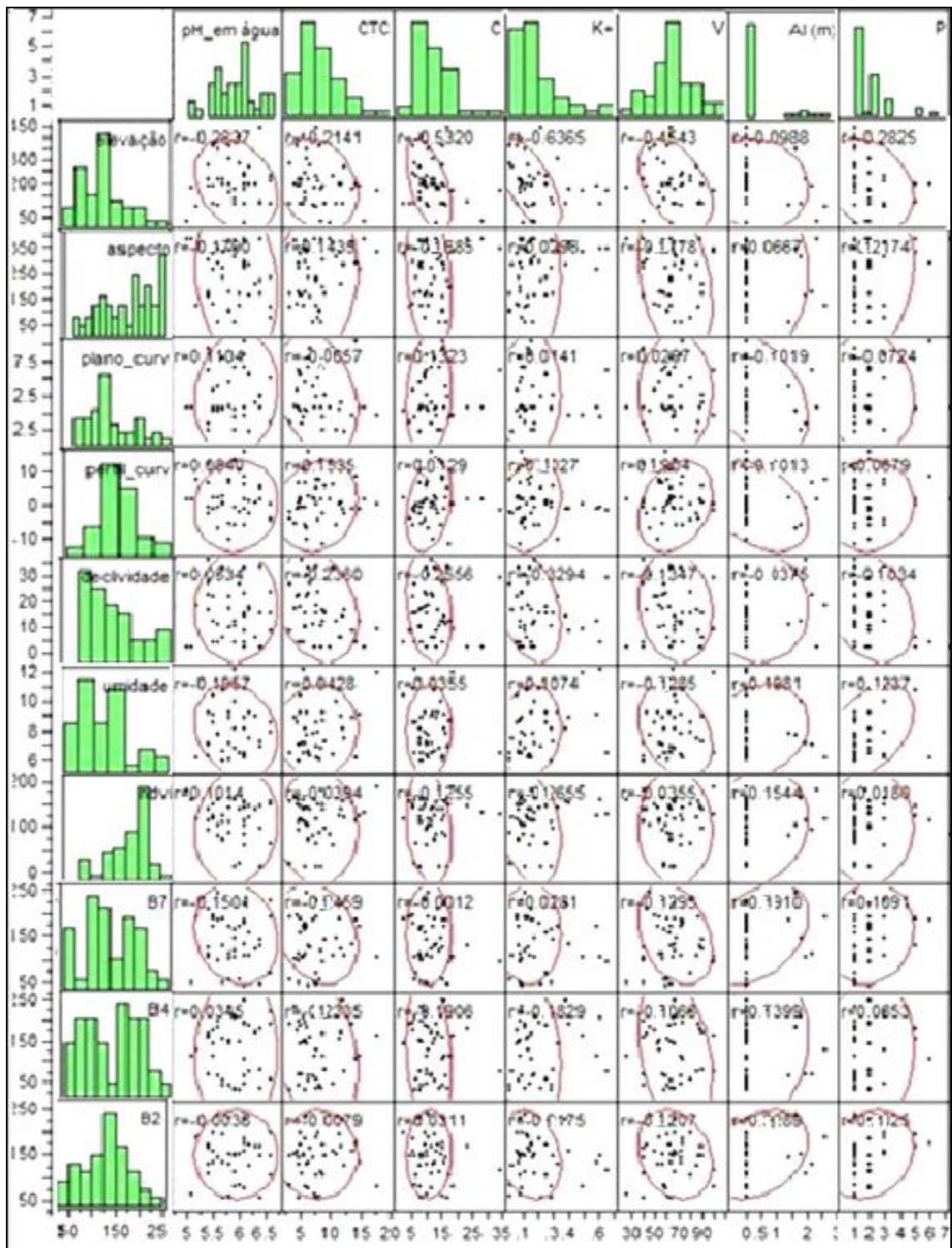


Figura 4.2.2: Correlação das variáveis de fertilidade e ambientais (sem valores extremos) da região Noroeste ($r \geq 0,23$ e $p < 0,20$).

Região Serrana

A figura 4.2.3 apresenta a correlação, na Região Serrana, tanto entre as variáveis químicas de fertilidade do solo quanto às variáveis ambientais no banco de dados de solo, após a retirada dos valores extremos dos dados das variáveis ambientais. Foi observado na análise de histogramas que no conjunto de dados da variável Índice de Umidade existia um valor extremo. Com a retirada desse valor houve uma melhor distribuição do histograma, que ficou mais simétrico. No conjunto de dados de declividade também podem se observar valores discrepantes (dois) e a retirada desses valores também resultou em uma distribuição mais homogênea do conjunto de dados.

Observando as correlações entre as variáveis de fertilidade e as variáveis ambientais, verifica-se que ocorreram maiores correlações significativas e positivas da ambiental Elevação com pH em água (0,62), C(0,52), CTC (0,41) e com a variável química P ocorreu uma correlação significativa negativa (-0,22).

Outras correlações significativas ocorreram, tais como a variável ambiental Declividade, que obteve correlação positiva com pH em água (0,62) e negativas com C (-0,39), K^+ (-0,28) e P (-0,25). A declividade tem sido considerada, por alguns autores (McDaniel et al. 1992), um dos mais importantes fatores abióticos que controlam o processo pedogenético em uma escala local ou regional. Estes resultados também foram semelhantes aos dos autores Tsui et al. (2004) que numa camada de 0-5 cm, encontraram maiores correlações negativas de Declividade com K^+ (cmol_c.kg) e com C(g/kg) orgânico. As correlações mais altas e positivas foram de Declividade com pH, na camada de 0-15cm.

Uma alta correlação negativa entre P(mg.kg) e Declividade foi observada na Tailândia em solos classificados como Nitossolo e Argissolo, por Sanghyoswat e Yost (2000). A erosão, que é o resultado de uma grande movimentação do solo e precipitações elevadas, característica da região Serrana, também contribui para o transporte de P(mg.kg) (Whittington, 1994).

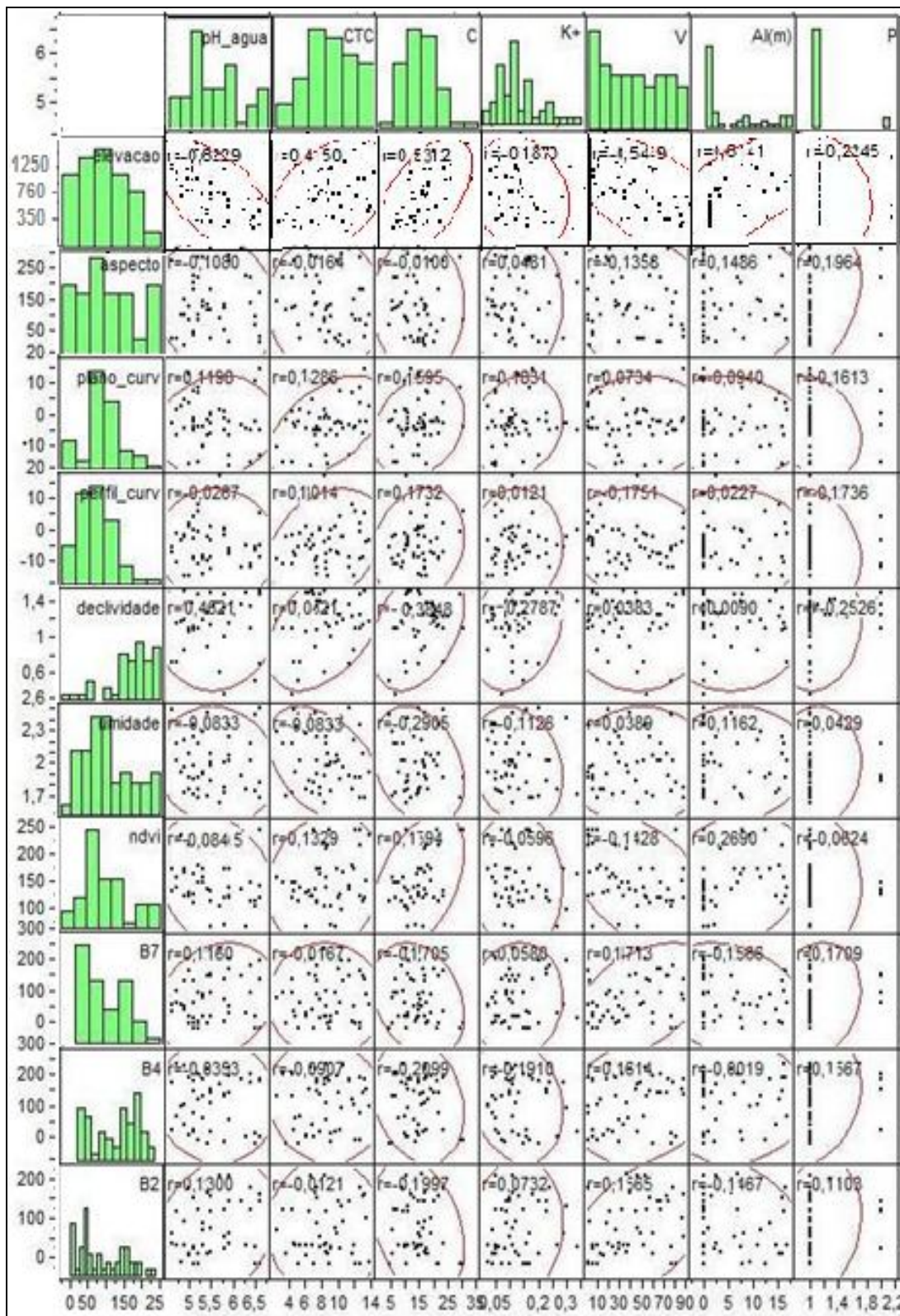


Figura 4.2.3: Correlação das variáveis de fertilidade e ambientais (sem valores extremos) da região Serrana ($r \geq 0,213$, $p < 0,20$).

4.3 – Predição e modelagem de atributos da fertilidade dos solos por Regressão Linear Múltipla

Após a análise de exploratória dos dados, apresentada nos itens 4.1 e 4.2, foi realizada a regressão linear multivariada, objetivando a predição e modelagem dos dados de cada atributo químico de fertilidade das regiões Norte, Noroeste e Serrana. Em modelos estatísticos é preciso seguir várias etapas de análise de dados antes de gerar mapas. Isto torna o processo de mapeamento complexo, mas facilita o conhecimento dos erros associados. Isto pode ser importante para: 1- produzir mapas mais confiáveis; 2- compreender fontes de erros nos dados (Hengl, 2007). Em todos os modelos preditos foi utilizada uma probabilidade de 25% para a entrada dos dados no *stepwise*. Este nível de significância está dentro do que é recomendado para o AIC que melhor corresponde ao intervalo de confiança recomendado para modelos de predição (entre 15% - 30%) (Atkinson, 1981). A seguir serão apresentados os resultados e os resumos estatísticos das regressões estimadas; estas estatísticas incluem o R^2 , RMSE, o AIC, Cp, a estatística F e sua probabilidade de ocorrência sob H_0 , para fins de comparação dos modelos preditos e escolha do melhor modelo a ser usado no mapeamento de cada atributo de fertilidade. Nessa análise comparativa foram considerados os menores valores de AIC e RMSE, maior valor de R^2 ajustado e a probabilidade de F ser diferente de zero.

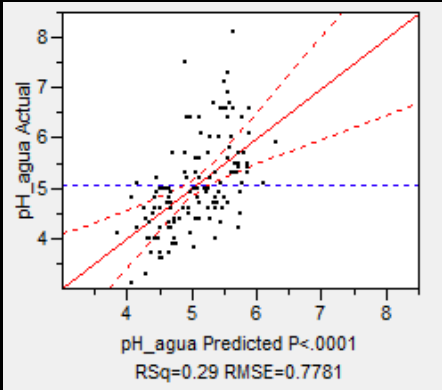
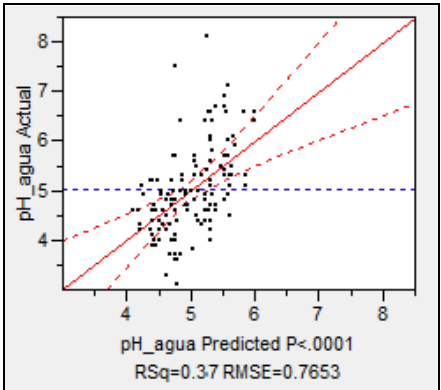
Região Norte

Nas análises de regressão que serão apresentadas a seguir, nas tabelas comparativas, observa-se que no modelo M2 os valores de AIC e RMSE diminuíram, os valores de R^2 ajustado ficaram maiores, a probabilidade de F ser diferente de zero aumentaram. Logo, estes resultados representam os melhores modelos. Menores valores de AIC e RMSE também foram considerados como melhor modelo por Mendonça-Santos et al. (2007b).

A tabela 4.3.1, ilustra as características do modelo construído antes (M1) e após a retirada de alguns valores discrepantes (M2) do atributo químico pH em água. Nesta tabela 4.3.1, pode-se observar que as variáveis ambientais derivadas de terreno (Perfil de Curvatura, Índice de Umidade), tipo de solo (Argissolo) e litologia (Granitos) explicaram a

variação de pH em água na região, com $R^2_{aj} = 0,32$. Hengl et al. (2003) realizaram regressão mais krigagem da variável pH (n=100 pontos) com dados ambientais, tais como Índice de Umidade, Declividade, Curvatura, entre outros, e utilizando regressão com o método *stepwise* para obter a predição da variável pH em água. Nesse caso, os autores obtiveram um coeficiente de determinação pequeno ($R^2_{aj}= 0,14$), que segundo os autores, indicam fraca correlação com os preditores usados.

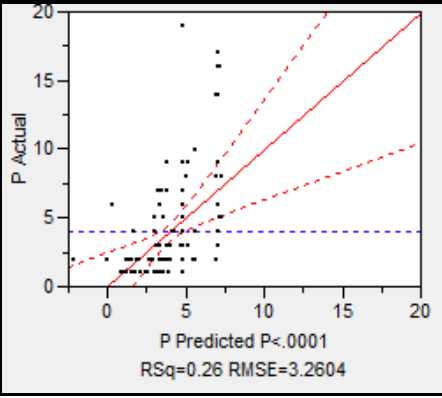
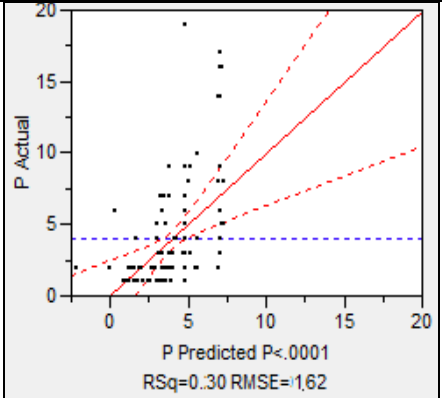
Tabela 4.3.1: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico pH em água da região Norte.

Fórmula	pH em água M1 n=133	pH em água M2 n= 130
		4,74 - 0,06*plano curv. + 0,03*umidade + 0,003*ndvi +0,54*argissolos - 0,40*gleissolo - 0,25*latossolo - 1,10*organossolo - 0,79*granitos
AIC	58,1	57,7
RMSE	0,78	0,76
Cp	8,96	5,00
R^2_{ajust}	0,27	0,32
Prob>F	<0001	<0001
F	7,26	9,95
pH em água gráfico da predição Atual X Predito		

A tabela 4.3.2 ilustra que a Variável P(mg.kg) foi explicada por derivadas de terreno (Elevação e Plano de Curvatura), tipo de solo (Neossolo, Organossolo, Granulitos) e litologia (Sedimentos Terciários). Estas variáveis explicaram a variação de P(mg.kg) na região, com $R^2_{aj} = 0,28$, apresentando um RMSE (1,68) baixo. A correlação entre a variável P(mg.kg) e as variáveis ambientais é fraca. A correlação negativa com a variável Elevação está relacionada ao fato que a sua disponibilidade é menor em locais de maior

elevação, devido à maior lixiviação de nutrientes nestas áreas. A correlação positiva com Neossolo, por exemplo, pode estar associada ao acúmulo de matéria orgânica, em geral, presentes neste tipo de solo. A matéria orgânica do solo proporciona um aumento na fixação das formas mais lábeis de fósforo, devido os sítios específicos de adsorção presentes nos componentes minerais da argila (Núñez et al., 2003).

Tabela 4.3.2: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico P (mg.kg) da região Norte.

Fórmula	P (mg.kg)M1 n=133	P (mg.kg) M2 n=125
		4,86 – 0,005*elevação + 0,19*plano curv -3,25*argissolo - 1,49*espodossolo – 3,26*latossolo + 2,20*granulito
AIC	266,7	102,4
RMSE	3,26	1,68
Cp	8,87	6,00
R ² _{ajust}	0,24	0,28
Prob>F	<0001	<0001
F	6,13	8,40
P(mg.kg) gráfico da predição		

Na tabela 4.3.3 pode-se observar que a variável C(org) foi explicada pelo O (organismos) do modelo SCORPAN (NDVI e banda 4 e banda 2), tipo de solo (Argissolo, Gleissolo e Latossolo), litologia (Sedimentos Terciários). Estas variáveis explicaram a variação de C (g/kg) na região, com R²_{aj} = 0,32. Mendonça-Santos, et al (2007) realizaram a predição do Carbono para o Estado do Rio de Janeiro, numa camada de 0-10 cm, analisando sete modelos com diferentes variáveis predictoras. Que, como no presente

trabalho, o modelo de predição do C (g/kg) foi explicado NDVI e Bandas do Landsat ETM⁺, tipos de solo e litologia. O desempenho dos modelos também foi estimado estatisticamente utilizando-se dos parâmetros RMSE e AIC.

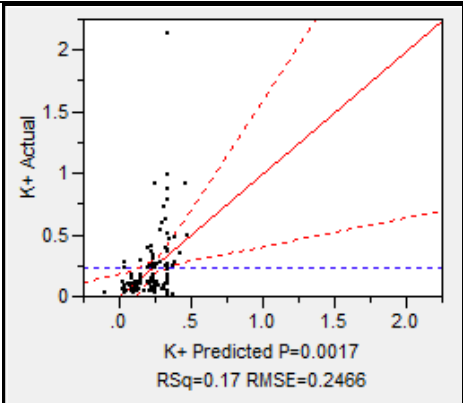
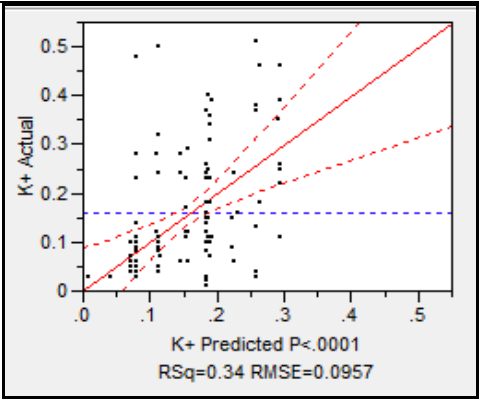
Tabela 4.3.3: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico C (g/kg) da região Norte.

Fórmula	C (g/kg) M1 n= 133	C (g/kg) M2 n= 128
		21,3 – 0,02*aspecto – 0,28*declividade – 4,88*argissolo + 5,85*cambissolo +12,1*gleissolo
AIC	627,3	488,5
RMSE	12,74	8,89
Cp	14,86	8,00
R ² _{ajust}	0,19	0,32
Prob>F	<0001	<0001
F	6,62	7,85
C(g/kg) gráfico da predição		

A tabela 4.3.4, ilustra que a variável K⁺ (cmol_c.kg) foi explicada por derivada de terreno (Índice de Umidade), tipo de solo (Cambissolo, Gleissolo, Organossolo) e litologia (Granitos). Apesar de a litologia ter explicado a variabilidade de K⁺ (cmol_c.kg) como a última variável, sua importância para a predição desta variável química é importante, devido, os solos tropicais possui 99% do seu potássio sob forma não trocável; a concepção desse elemento pode ser constituída pelos minerais do solo em via de alteração, por exemplo, um granito rico em quartzo. Estas variáveis explicaram a variação de K⁺(cmol_c.kg)na região, com R²_{aj} = 0,30, com um RMSE= 0,09 que pode ser considerado baixo. Trabalhos relacionados a predição de variáveis do solo como de Tsai, et al, (2001),

analisaram variáveis como o K^+ (cmol_c.kg), usando o RMSE para testar o melhor modelo de predição.

Tabela 4.3.4: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico K^+ (cmol_c.kg) da região Norte.

	K^+ (cmol _c .kg) M1 n= 133	K^+ (cmol _c .kg) M2 n=125
Fórmula	0,42 – 0,01*plano curv – 0,19*espodossolo – 0,09*latossolo + 0,24*organossolo – 0,11*granitos – 0,08*migmatito – 0,08*sed. Holocênicos	0,14 + 0,004 * umidade + 0,09 * cambissolo + 0,06 * gleissolo + 0,30 * organossolo + 0,07 * :granitos
AIC	494,6	345,0
RMSE	0,25	0,09
Cp	10,1	8,00
R²_{ajust}	0,13	0,30
Prob>F	0,002	<0001
F	3,56	7,28
K^+ (cmol_c.kg) gráfico da predição		

Na tabela 4.3.5 pode-se observar que o atributo CTC (cmol_c.kg) foi explicado pelas variáveis ambientais: de derivadas de terreno (Índice de Umidade) e tipo de solo (Cambissolo, Gleissolo e Neossolo). Na regressão, estas variáveis explicaram mais da metade da variação de CTC (cmol_c.kg) no solo, apresentando um $R^2_{aj} = 0,53$, e um RMSE = 7,13. Bispo e McBratney (2001) também houve baixa correlação entre os atributos de terreno e variabilidade CTC (cmol_c.kg), devido a área de estudo está inserida em uma planície, ocorrendo uma correlação razoável com o Índice de Umidade, este resultado corrobora o presente trabalho. Estes mesmo autores também utilizaram o parâmetro RMSE

para testar modelos de predição espacial da CTC (cmol_c.kg) no solo na camada de 0-10 cm e também conseguiram valores de RMSE considerados baixos.

Tabela 4.3.5: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico CTC (cmol_c.kg) da região Norte.

	CTC (cmol _c .kg) M1 n= 133	CTC(cmol _c .kg) M2 n= 128
Fórmula	22,6 – 0,01*aspecto + 0,31*umidade – 0,06*ndvi – 4,615*argissolo + 5,09*cambissolo + 14,5*gleissolo + 6,11*neossolo – 4,43*gnaisse + 3,90*granitos – 4,38*migmatito + 0,01*B4 – 0,05*B2	8,38 + 0,32 * umidade + 4,56 * cambissolo + 16,2 * gleissolo + 7,83*neossolo – 0,03 * B4
AIC	518,6	457,8
RMSE	7,23	7,13
Cp	6,10	6,00
R²_{ajust}	0,50	0,53
Prob>F	<0001	<0001
F	13,4	24,1
CTC (cmol_c.kg) gráfico da predição		

A tabela 4.3.6, ilustra que a variável Al(m)% foi explicada por derivada de terreno (Índice de Umidade), tipo de solo (Latosolo e Neossolo) e litologia (Granitos e Sedimento Holocênicos). Na regressão estas variáveis explicaram pouco menos da metade da variação do Al(m)% na região com um $R^2_{aj} = 0,43$. Os Latossolos que ocupam 17,19% (Lumbreras, et al 2004) na região Norte, influenciaram a predição do Al(m), estes solos, segundo Carvalho, et al. 2007, em geral, são álicos, ou seja, apresentam saturação de alumínio superior a 50%. Os Neossolos também influenciaram a predição da variável Al(m)% na região, este tipo de solo ocorre em 10,94% na região, em geral, localizado na baixada

flúvio-deltaica do rio Paraíba do Sul (Lumbreras, et al 2004), este tipo de solo possui um indicativo de saturação por alumínio igual ou superior a 50% (IBGE, 2007).

Tabela 4.3.6: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico Al(m) da região Norte.

	Al(m) % M1 n= 133	Al(m) % M2 n= 131
Fórmula	8,99 + 0,55*plano curv – 0,50*umidade – 5,51*argissolo – 6,81*cambissolo + 3,43*gnaisse + 2,62*granulito + 5,16*migmatito + 0,01*B7	12,9 + 0,78 * umidade + 6,18 * latossolo + 7,46 * neossolo + 10,2 * granitos + 4,76 * sed_holocênicos
AIC	469,1	419,0
RMSE	6,51	6,50
Cp	10,9	7,00
R²_{ajust}	0,42	0,43
Prob>F	<0001	<0001
F	11,3	12,9
Al(m)% gráfico da predição		

Na tabela 4.3.7 pode-se observar que a variável V% foi explicada por derivada de terreno (Declividade e Índice de Umidade), tipo de solo (Argissolo) e litologia (Gnaisse, Migmatitos e Granitos). Os atributos de terreno como Declividade e Índice de Umidade influenciaram a predição da variável V%, devido às características do relevo, que também é constituído pela Serra do Mar e tabuleiros costeiros (Lumbreras, et al 2004). Estas variáveis explicaram significativamente a variação de V% na região, com $R^2_{aj} = 0,43$. A variável ambiental Argissolo obteve a maior correlação positiva com a o atributo V%. Este fato pode estar relacionado como a ocorrência bastante representativa deste tipo de solo na região (46,88%) Lumbreras, et al (2004). Segundo Antonello et al (2000) os Argissolos, em

geral, possuem média saturação por base, o que condiz com os aspectos da fertilidade do solo na região Norte.

Tabela 4.3.7: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico V% da região Norte.

	V(%) M1 n=133	V(%) M1 n=130
Fórmula	27,1 + 0,63*declividade + 1,90*umidade + 0,05*ndvi + 21,9*argissolo – 3,87*gnaisse – 20,3*granito – 5,77*granulito – 9,45*migmatito	36,0 + 0,55 * declividade + 1,79 * umidade + 19,9 * argissolo + 8,77 * gnaisse – 7,85 * migmatitos -18,7 * granitos
AIC	615,7	415,2
RMSE	21,3	20,8
Cp	1,47	1,19
R²_{ajust}	0,39	0,43
Prob>F	<0001	<0001
F	5,80	8,70
V% gráfico da predição		

O aumento do valor de R^2 ocorreu na maioria das variáveis preditas após a retirada de valores extremos, exceto nas variáveis CTC, saturação por Al e V% que se mantiveram com os mesmos valores de R^2 . Os valores de AIC, em todas as variáveis, após a retirada de valores extremos diminuiram, exceto o da variável pH em água (Tabela 4.3.1), já que a diferença não foi significativa entre os modelos M1 e M2.

O RMSE de todas as variáveis diminuiu, após a retirada de valores extremos, exceto na saturação por Al (Tabela 4.3.6). Em relação ao Cp, todos os modelos tiveram seus valores menores nos modelos M2. Segundo Montgomery e Runger (2003) é importante

optar por modelos onde o Cp é pequeno. Um valor baixo de Cp indica que o modelo é relativamente preciso.

Região Noroeste

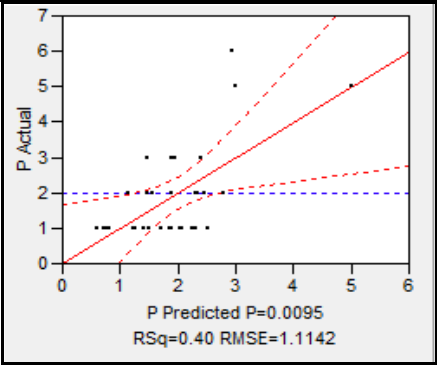
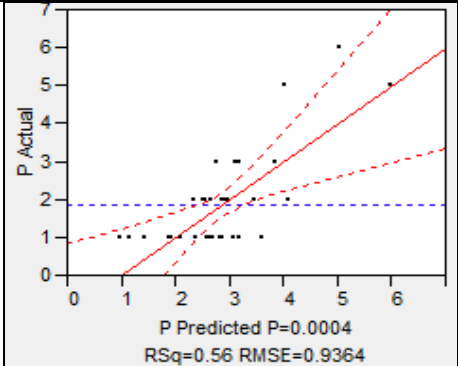
A tabela 4.3.8, ilustra as características dos modelos construídos antes (M1) e após a retirada de alguns valores discrepantes (M2). Ainda na tabela 4.3.8, pode-se verificar que as variáveis ambientais de tipo de solo (Argissolo e Latossolo), derivada do terreno (Elevação) e litologia (Mármore), explicaram a variação de pH em água na região, com $R^2_{aj} = 0,34$. Os Argissolos e os Latossolos influenciaram na predição de pH em água. Os Argissolos ocorrem de forma expressiva na região com 64,58% (Lumbreras et al. 2004) na região Noroeste, ou seja, mais da metade. Os Latossolos também são importantes para a região, vindo logo depois dos Argissolos, com 16,67% (Lumbreras et al. 2004) na região Noroeste. Segundo Johnson, et al. (2000) para uma análise do terreno ser útil para a predição da química do solo, os atributos do terreno utilizados na modelagem devem ser correlacionados com as propriedades do solo. Se esta condição for cumprida, as tecnologias de SIG podem ser usadas para prever as propriedades químicas com uma resolução espacial, muitas vezes impossível de alcançar através do trabalho de campo. A Elevação também influenciou a predição de pH em água. Como o relevo da região é bastante movimentado, esta variável torna-se importante para explicar a variabilidade de pH na região. Moore et al. (1993) foram capazes de explicar 48,3% da variação de pH com quatro atributos do terreno (Elevação, Declividade, Aspecto, entre outros), após uma análise de correlação dos dados. O nível de significância entre as correlações, na maioria das vezes, é baixo, por muitas propriedades do solo ter grande variabilidade e por variáveis químicas e variáveis ambientais terem origens diferenciadas.

Tabela 4.3.8: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico pH em água da região Noroeste.

	pH em água M1 n= 45	pH em água M1 n= 42
Fórmula	$5,58 + 0,34 * \text{argissolo} - 0,71 * \text{latossolo} + 0,28 * \text{mármore} - 0,002 * B7 + 0,002$	$5,351 + 0,340 * \text{argissolo} - 0,592 * \text{latossolo} + 0,001 * \text{elevação} + 0,281 * \text{mármore}$
AIC	-52,9	-69.39
RMSE	0,49	0.38
Cp	6,06	1.14
R²_{ajust}	0,29	0.34
Prob>F	0,016	0.003
F	3,26	3.94
pH em água gráfico da predição		

Na tabela 4.3.9, pode-se verificar que as variáveis ambientais de relevo (Aspecto e Declividade) e tipo de solo (Planossolo) explicaram a variação de P (mg.kg) na região, com um $R^2_{aj} = 0,52$, mostrando uma forte correlação com as variáveis ambientais. Wang et al. (2009) em um estudo na região da China em solos como Neossolo Quartzarênico, também obtiveram correlações significativas de P (mg.kg) com variáveis ambientais como Aspecto e Elevação. Para os autores, os fatores topográficos, vegetação e tipos de solos podem influenciar na fertilidade do solo. As derivadas de terreno influenciaram a predição de P (mg.kg), devido aos fatores topográficos da região Noroeste e o tipo de solo, como o Planossolo que também explicou a variabilidade de P (mg.kg) e que representa 4,17% na região, e se encontram nas posições ligeiramente mais elevadas da região (Lumbreras, et al 2004).

Tabela 4.3.9: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico P (mg.kg) da região Noroeste.

Fórmula	P(mg.kg) M1 n= 46	P(mg.kg) M2 n=35
		1,26 + 0,005*aspecto+0,07*plano curv. - 0,05*declividade - 0,10*umidade + 2,84*planossolo + 0,01*B7
AIC	11,0	8,26
RMSE	1,11	0,94
Cp	5,00	1,10
R²_{ajust}	0,37	0,52
Prob>F	0.009	0,0004
F	4,22	6,03
P (mg.kg) gráfico da predição		

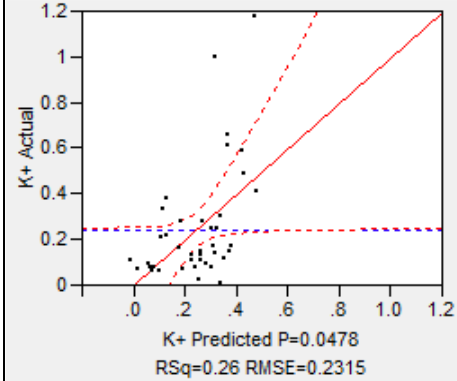
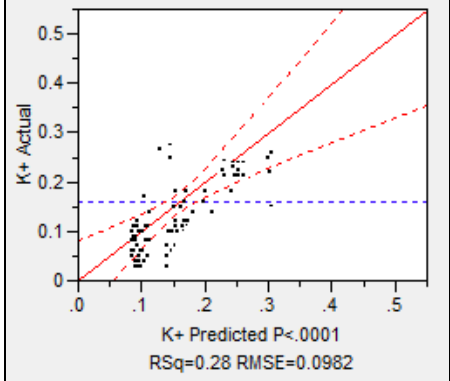
Na tabela 4.3.10, pode-se verificar que as variáveis ambientais de derivadas do terreno (Perfil de Curvatura e Índice de Umidade), organismo (NDVI), tipo de solo (Argissolo), udo do solo (Banda 7 e Banda 2) e litologia (Granulitos, Mármore e Migmatito Sedimentos Holocênicos) explicaram a variação de C (gk/g) na região, com um $R^2_{aj} = 0,29$. As derivadas de terreno, principalmente o Perfil de Curvatura influenciaram a predição de C(gk/g) pelas características do relevo movimentado. As variáveis ambientais como Índice de Umidade e Plano de Curvatura, numa região a oeste da França, mostraram ter uma contribuição significativa para estimativa de carbono nos solos (Chaplot et al. 2001). Este fato também ocorreu neste estudo, onde atributos de relevo como Índice de Umidade e Plano de Curvatura apresentaram maiores correlações com C(gk/g).

Tabela 4.3.10: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos em algumas do atributo químico C (g/kg) da região Noroeste.

	C (g/kg) M1 n= 46	C (g/kg) M2 n= 42
Fórmula	15,8 + 0,10 * perfil_curv + 0,08 * umidade + 0,03 * ndvi + 0,04 * argissolo + 0,04 * B7 + 0,06 *granulitos + 0,03* migmatito + 0,05 * sed_holocênicos	11,8 + 0,10 * perfil_curv + 0,18 * umidade + 0,13 * ndvi + 0,04 * argissolo + 0,04 * B7 + 0,06 * B2 + 0,02 * granulitos- 0,10 * mármore + 0,03 * migmatito + 0,05 * sed_holocênicos
AIC	138,7	124,5
RMSE	5,88	5,49
Cp	11,6	11,0
R²_{ajust}	0,10	0,29
Prob>F	0,13	0,004
F	1,97	2,34
C (g/kg) gráfico da predição		

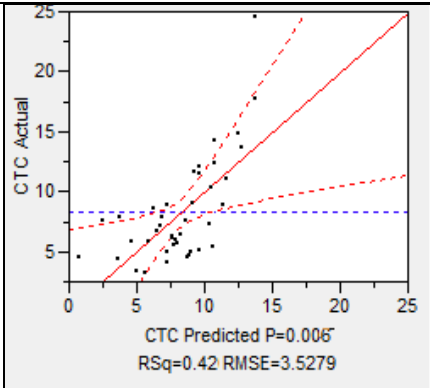
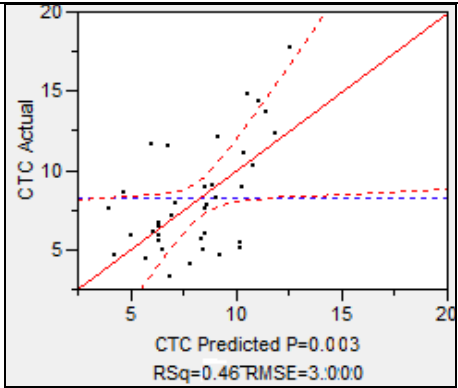
Na tabela 4.3.11, pode-se verificar que as variáveis ambientais de litologia (Granito e Mármore), explicaram a variação de K^+ ($\text{cmol}_c.\text{kg}$) na região, com um $R^2_{aj} = 0,25$. Barthold, et al. (2008) verificaram que, numa região de floresta tropical úmida sob solos do tipo Latossolo e Cambissolo, em seus resultados de predição a variabilidade da variável potássio no solo não foi controlada por variáveis topográficas e sim por variáveis litológicas. Este fato também ocorreu no presente estudo, onde em muitos estudos, os atributos de relevo são, em geral, os que mais ajudam a explicar a variação das propriedades químicas do solo. Mas neste caso, as litologias da região foram responsáveis pela a variação de K^+ ($\text{cmol}_c.\text{kg}$) na região. A litologia é importante devido a sua influência na composição química e mineralógica do solo, por exemplo: solos desenvolvidos de granito, portadores de mica, tendem a originar solos com teor de potássio (Brady e Weil, 1999).

Tabela 4.3.11: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico K⁺ (cmol_c.kg) da região Noroeste.

	K⁺ (cmol_c.kg)M1 n= 46	K⁺ (cmol_c.kg)M2 n= 40
Fórmula	0,63 – 0,001*elevação – 0,03*umidade + 0,22*gleissolo + 0,10*granito – 0,001*B7	0,07 + 0,010 * granito + 0,13 * mármores
AIC	191,7	110,4
RMSE	0,23	0,10
Cp	5,21	5,00
R²_{ajust}	0,22	0,25
Prob>F	0,05	<0001
F	2,52	10,04
K⁺ (cmol_c.kg) gráfico da predição		

Na tabela 4.3.12, pode-se verificar que as variáveis ambientais de derivadas de terreno (Elevação, Aspecto e Índice de Umidade), organismos (NDVI, Banda 4) e litologia (Mármores) explicaram a variação de CTC (cmol_c.kg) na região, com $R^2_{aj} = 0,44$. As derivadas de terreno que influenciaram na predição, principalmente a Elevação e o Aspecto foram importantes porque retratam as características do relevo da região. Por predomínio de um relevo fortemente ondulado e topografia bastante variável da região. Johnson, et al. (2000) exploraram as inter-relações entre propriedades químicas do solo e as relações entre os atributos do solo (variáveis ambientais). Ainda segundo os autores este método, pode ser possível de desenvolver relações quantitativas para prever as propriedades do solo que são muitas vezes difíceis de mensurar como, por exemplo, a CTC (cmol_c.kg) do solo. E no presente trabalho, a predição de variáveis como a CTC (cmol_c.kg) foi possível com a utilização das variáveis ambientais, principalmente pelos atributos de relevo.

Tabela 4.3.12: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico CTC (cmol_c.kg) da região Noroeste.

	CTC (cmol_c.kg⁻¹) M1 n= 45	CTC (cmol_c.kg⁻¹) M2 n= 41
Fórmula	11,64 - 0,01*elevação + 0,01*aspecto - 0,66*umidade + 0,06*ndvi + 3,48*gleissolo - 2,83*gnaisse + 0,77*mármore - 0,04*B4	6,49 - 0,01 * elevação + 0,12 * aspecto + 0,46 * umidade + 0,06 * ndvi - 0,03 * B4 + 2,33 * mármore
AIC	109.9	73.8
RMSE	3.53	3.00
Cp	2.12	3.33
R²_{ajust}	0.40	0.44
Prob>F	0.006	0.003
F	3.42	3.75
CTC (cmol_c.kg) gráfico da predição		

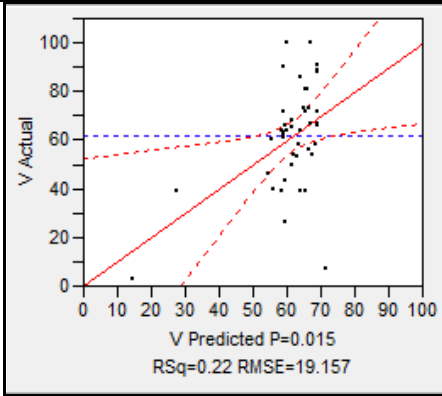
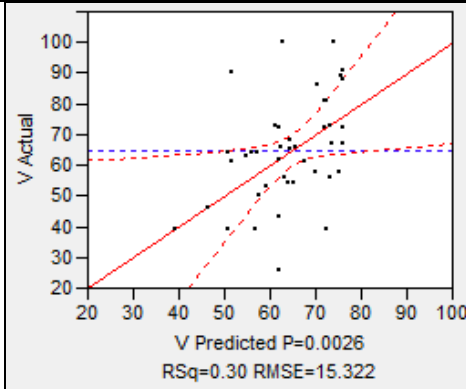
Na tabela 4.3.13, pode-se verificar que as variáveis ambientais de derivadas do terreno (Declividade), tipo de solo (Argissolo e Gleissolo), uso do solo (Banda 7) e litologia (Quartzitos) que explicaram a variação de Al(m)% na região, com um $R^2_{aj} = 0,40$. A Declividade influenciou a predição de Al(m)% na região. Esta variável ambiental é importante na paisagem por ser uma região que possui declividades maiores que 45%. A variável ambiental que obteve maior correlação com Al(m)% foi Argissolo. Segundo Streck et al. (2002), os Argissolos podem apresentar limitações químicas devido à baixa fertilidade natural, forte acidez e alta saturação por alumínio. Como já foi mencionado, este tipo solo é importante, por ocorrer de forma expressiva nesta região.

Tabela 4.3.13: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos em algumas do atributo químico Al(m)% da região Noroeste.

Fórmula	Al(m) % M1 n= 45	Al(m) % M2 n= 40
		0,59 – 0,001*aspecto – 0,11*umidade + 0,49*granulito + 0,88*quartzito + 0,004 * B7
AIC	24,4	18,5
RMSE	0,70	0,61
Cp	12,9	6,00
R ² _{ajust}	0,27	0,40
Prob>F	0,06	0,013
F	2,37	3,67
Al(m)% gráfico da predição		

Na tabela 4.3.14, pode-se verificar que as variáveis ambientais de derivadas de terreno (Elevação e Declividade) e tipo de solo (Argissolo e Latossolo) explicaram a variação de V% na região, com um $R^2_{aj} = 0,29$. As variáveis ambientais, Elevação e Declividade, influenciaram na predição de V%. Como já mencionado as derivadas de terreno possuem grandes influencia na variabilidade de variáveis química devido ao tipo de relevo da região Noroeste. Os tipos de solos também foram importantes na predição os Argissolos e Latossolos ocupam boa parte da região, 64,58% e 16,67%, respectivamente. A topografia pode ter um efeito direto sobre o crescimento e a produção das culturas, redirecionando e alterando a disponibilidade de água no solo e influência sobre a distribuição de propriedades químicas do solo e físicas, tais como a saturação por bases (Franzmeier et al., 1969; Stone et al., 1994).

Tabela 4.3.14: Características dos modelos de regressão múltipla antes e após a retirada de valores extremos do atributo químico V% da região Noroeste.

	V(%) M1 n= 46	V(%) M2 n=43
Fórmula	-0,11 + 0,001 *aspecto + 0,01 *ndvi + 0,59 *latossolo + 0,66 *planossolo + 0,15 *granito + 0,48 *mármorees – 0,01 *B4 + 0,004 *B2	52,4 - 0,02 * elevação + 6,67 * argissolo - 21,9 * latossolo + 14,9 * declividade
AIC	231,0	212,1
RMSE	19,1	15,3
Cp	6,50	5,00
R²_{ajust}	0,18	0,29
Prob>F	0,01	0,003
F	3,92	3,95
V% gráfico da predição		

Os valores de AIC, após a retirada dos valores extremos, M2, diminuiram em todas as variáveis, exceto em P que não obteve um melhor resultado significativo do AIC, mas os demais parâmetros obtiveram melhores resultados que o modelo M1. Os valores de RMSE também diminuiram após a retirada de valores extremos. O mesmo ocorreu com os valores de Cp. Os valores de R² ajustado também obtiveram melhores resultados nos modelos M2 para todas as variáveis, obtendo maiores valores.

Os valores de F e a probabilidade de F obtiveram melhores resultados em todos os modelos M2 (após a retirada de valores extremos). A diferença supera o mínimo necessário para caracterizar uma diferença significativa, mostrando que, estatisticamente, há divergência entre os modelos M1 e M2.

Região Serrana

Nas análises de regressão que serão apresentadas a seguir, nas tabelas comparativas, observa-se que o modelo M2, os valores de AIC e RMSE diminuíram; os valores de R^2 ajustado ficaram maiores; a probabilidade de F ser diferente de zero aumentaram. Logo, estes resultados representam os melhores modelos. As tabelas a seguir, ilustram as características dos modelos construídos antes (M1) e após a retirada de alguns valores discrepantes (M2).

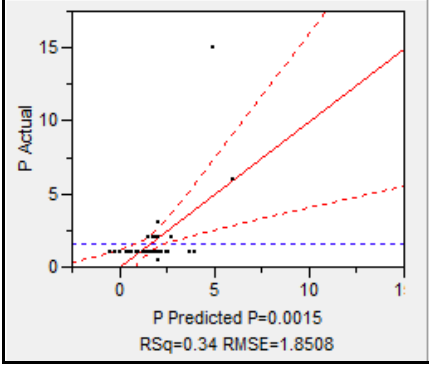
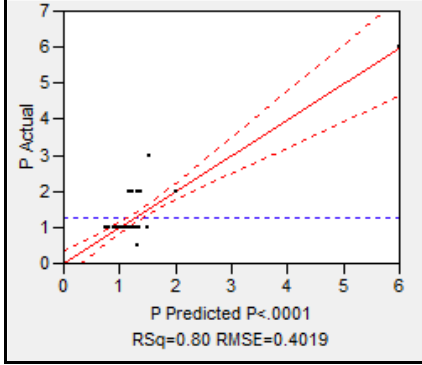
A tabela 4.3.15 ilustra as características dos modelos de Regressão Linear Múltipla (RLM), antes e após a retirada de alguns valores discrepantes. As variáveis ambientais que sofreram retiradas de valores discrepantes foram: Declividade (1 ponto) e Índice de Umidade (2 pontos). Nessa tabela 4.3.3, pode-se verificar que as variáveis ambientais de relevo (Declividade e Aspecto) e tipo de solo (Argissolo) foram atribuídas à paisagem. Explicaram a variação de pH em água na região, com $R^2_{aj} = 0,46$, indicando ser significativo e com forte correlação entre as variáveis. Rezai e Gilkes (2003) encontraram, em uma região semi-árida do Brasil, numa camada também de 0-10 cm, uma correlação significativa entre variáveis ambientais de Declividade e Aspecto.

Tabela 4.3.15: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável pH em água da região Serrana.

	pH em água M1 n= 50	pH em água M2 n=47
Fórmula	5,82 - 0,001*elevação + 0,02*plano curv. + 0,65*neossolo + 0,68*sed.holocênico + 0,96*rochas básicas	5,30 - 0,005 * elevação - 0,001 * aspecto + 0,48 * argissolo
AIC	63,6	56,5
RMSE	5,00	0,42
Cp	2,75	5,00
R²_{ajust}	0,42	0,46
Prob>F	<0001	0.0001
F	8,24	8,33
pH em água gráfico da predição		

Na tabela 4.3.16, pode-se verificar que as variáveis ambientais de relevo (Declividade e Índice de Umidade) e litologia (Gnaiss) foram atribuídas a paisagem. Explicaram a variação de P(mg.kg) na região, com $R^2_{aj} = 0,77$, apresentando uma correlação bastante significativa. A topografia foi importante para explicar a variabilidade de P na região, a Declividade, por exemplo, obteve uma correlação negativa. Possivelmente está associado ao fato de que Declividades consideradas altas, maiores que 45%, podem influenciar de maneira intensa a lixiviação de nutrientes. A correlação negativa entre o Argissolo e o P(mg.kg) pode estar associada ao fato de que, como a maioria dos solos brasileiros, este tipo de solos apresenta baixa disponibilidade de fósforo. O fósforo nos solos tropicais encontra-se adsorvido com alta energia de ligação e conseqüentemente, pouco disponível para as plantas (Sharpley e Halvorson, 1994).

Tabela 4.2.16: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável P (mg.kg) da região Serrana.

	P(mg.kg) M1 n= 50	P(mg.kg) M2 n= 42
Fórmula	1,54 + 0,001*aspecto – 0,003*ndvi – 0,24*argissolo + 4,36*neossolo + 0,68* gnaisse	1,25 - 0,03* declividade + 0,03* umidade - 0,09 * argissolo
AIC	62,6	76,5
RMSE	1,85	0,40
Cp	12,9	6,00
R²_{ajust}	0,27	0,77
Prob>F	0,001	<0001
F	5,29	31,0
P (mg.kg) gráfico da predição		

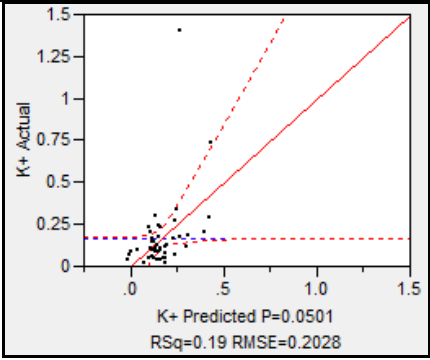
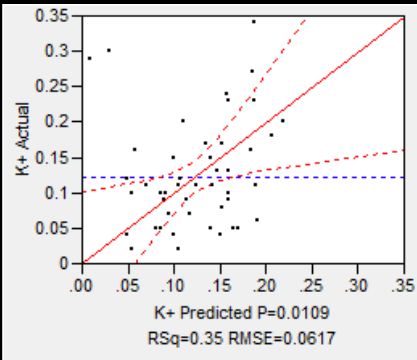
Na tabela 4.3.17, pode-se verificar que as variáveis ambientais de atributo de relevo (Elevação), tipo de solo (Latosolo) e organismo (NDVI) foram atribuídos a paisagem, explicaram a variação de C(g/kg) na região, com $R^2_{aj} = 0,56$, indicando uma forte correlação entre as variáveis ambientais e a variável química. A Elevação como primeira variável a explicar a variação de C (g/kg) na região. Mueller e Pierce (2003) obtiveram resultados satisfatórios na predição de C(g/kg) com a correlação do atributo de terreno como a Elevação. A variável Latossolo foi a variável de maior correlação com C(g/kg). Este fato pode estar associado ao armazenamento de carbono superficial relacionado aos minerais de argila, e aos maiores teores de ferro, que são apontados como importantes fatores de proteção física do carbono orgânico no solo (Telles et al. 2002).

Tabela 4.3.17: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável C (g/kg) da região Serrana.

Fórmula	C (g/kg) M1 n= 50	C (g/kg) M2 n= 48
		-9,82 + 0,01*elevação + 0,06*B7 - 0,02*B4 0,08* sed.holocênico
AIC	195,3	113,9
RMSE	6,67	4,89
Cp	2,13	3,00
R²_{ajust}	0,35	0,36
Prob>F	0,0002	0,001
F	6,40	10,4
C (g/kg) gráfico da predição		

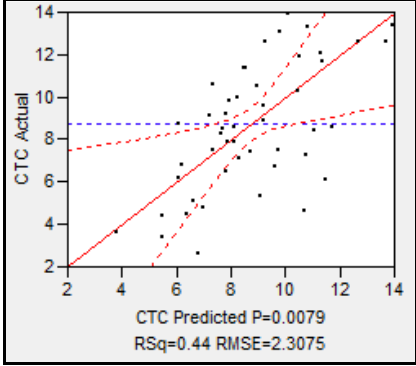
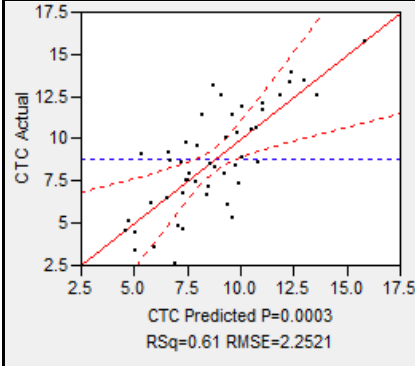
Na tabela 4.3.18, pode-se verificar que as variáveis ambientais de atributos do relevo (Perfil de Curvatura e Declividade), tipo de solo (Argissolo) e litologia (Rochas Básicas) foram atribuídos a paisagem. Explicaram a variação de K^+ (cmol_c.kg) na região, com $R^2_{aj} = 0,30$. A variável ambiental Declividade obteve maior correlação negativa com K^+ (cmol_c.kg). As maiores restrições à produção agrícola incluem a declividade (altos gradientes, declives íngremes), solos com risco de erosão e maior lixiviação de nutrientes. As condições topográficas e orográficas da região facilitam a ocorrência de chuvas abundantes e concentradas, em especial no verão. Podem provocar grandes movimentos de massa, dados pelas encostas de alta declividade, contato solo-rocha abrupto, presença de grandes matacões na matriz do solo, ou quase soltos na superfície, áreas de convergência de fluxo de água, rochas falhadas e fraturadas, que dão ainda mais instabilidade às encostas (Gonçalves e Guerra, 2005; Guerra et al., 2007).

Tabela 4.3.18: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável K⁺ (cmol_c.kg) da região Serrana.

	K⁺ (cmol_c.kg) M1 n= 50	K⁺ (cmol_c.kg) M2 n= 46
Fórmula	-0,015 + 0,006*perfil curv.+ 0,003*declividade + 0,309*gleissolo + 0,146* sed.holocênico	0,004 + 0,002 * perfil_curv - 0,08 * declividade - 0,05 * argissolo - 0,04 * rochas_básicas
AIC	-148,4	-184,8
RMSE	0,20	0,06
Cp	5,77	5,00
R²_{ajust}	0,11	0,30
Prob>F	0,05	0,0001
F	2,59	3,97
K⁺ (cmol_c.kg) gráfico da predição		

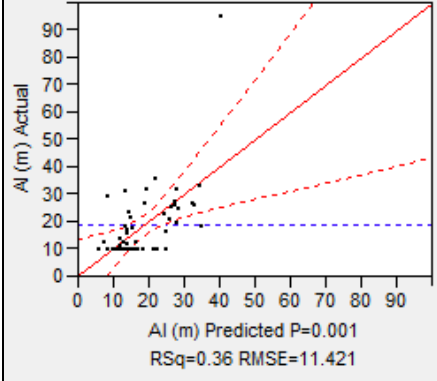
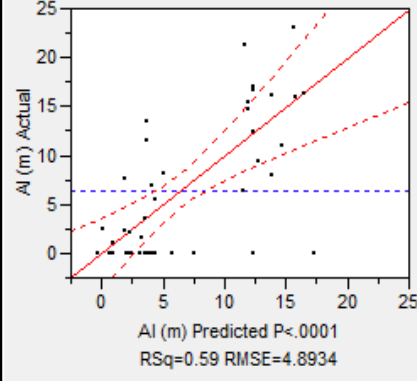
Na tabela 4.3.19, pode-se verificar que as variáveis ambientais de relevo (Elevação e Índice de Umidade), tipo de solo (Latosolo) foram atribuídos a paisagem. Explicaram a variação CTC (cmol_c.kg) na região, com $R^2_{aj} = 0,56$, indicando se significativo e com forte correlação entre as variáveis e apresentando um RMSE baixo. Sendo assim, a predição pode ser considerada de qualidade. Segundo Bispo e McBratney (2001) em estudo na Austrália, na camada de 0-15 cm com 113 amostras de solo, usando também como medida de qualidade da predição o parâmetro RMSE, obtiveram uma razoável correlação entre Elevação e CTC (cmol_c.kg) e entre as demais variáveis ambientais, como por exemplo, Declividade, as correlações não foram consideradas boas e o RMSE não foram tão baixo. E segundo estes autores, quanto maior a correlação entre as variáveis menor deve ser o RMSE.

Tabela 4.3.19: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável CTC (cmol_c.kg) da região Serrana.

	CTC (cmol_c.kg) M1 n= 50	CTC (cmol_c.kg) M2 n= 47
Fórmula	-3,53 + 0,008*elevação – 0,008*aspecto + 0,18*plano curv. + 0,05*declividade + 0,32*umidade + 0,01*ndvi + 0,27*argissolo – 4,09*cambissolo + 4,33*neossolo	1,89 + 0,004 * elevação + 3,62 * latossolo + 0,32*umidade
AIC	92,8	73,1
RMSE	2,31	2,25
Cp	17,18	11,08
R²_{ajust}	0,32	0,56
Prob>F	0,008	0,0003
F	3,70	4,47
CTC (cmol_c.kg) gráfico da predição		

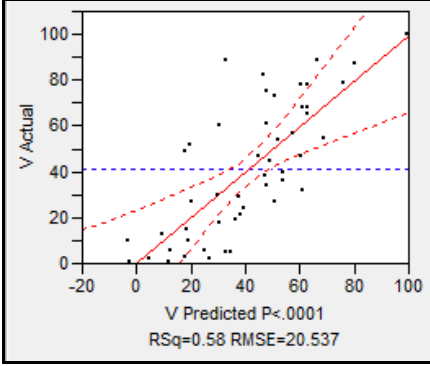
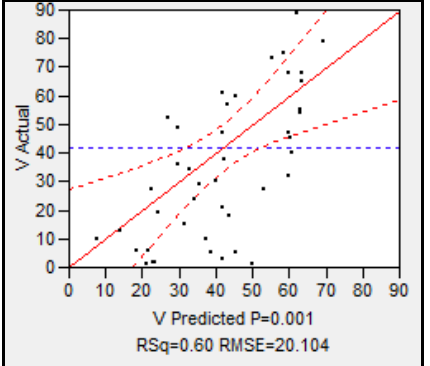
Na tabela 4.3.20, pode-se verificar que as variáveis ambientais de atributos de relevo (Aspecto e Índice de Umidade), tipo de solo (Argissolo e Latossolo) foram atribuídos a paisagem, explicaram a variação de Al(m)% na região, com $R^2_{aj} = 0,54$, indicando uma correlação significativa entre as variáveis ambientais e a variável química. A variável de relevo Aspecto como a primeira variável importante para explicar a variação de Al(m)%, indica que o relevo movimentado da região é um fator importante para explicar variáveis químicas do solo, como pode ser verificado com algumas demais variáveis químicas. O Latossolo foi a segunda variável que obteve maior correlação com Al(m)%. Esses solos são importantes porque ocorrem na região, em geral, esses solos são álicos com saturação por alumínio acima de 50% (IBGE, 2007).

Tabela 4.3.20: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável Al(m)% da região Serrana.

Fórmula	Al(m) % M1 n= 50	Al(m) % M2 n= 49
		-5,29 + 0,03*aspecto + 0,931*umidade + 16,6*cambissolo + 10,9*latossolo - 0,03*B4
AIC	249,1	115,7
RMSE	11,4	4,89
Cp	8,31	5,00
R²_{ajust}	0,29	0,54
Prob>F	0,001	<0001
F	5,00	10,85
Al(m)% gráfico da predição		

Na tabela 4.3.21, pode-se verificar que as variáveis ambientais de tipo de solo (Latossolo) e organismo (banda 7) foram atribuídos a paisagem. Explicaram a variação de V% na região, com $R^2_{aj} = 0,58$. A correlação da variável química V% com a variável ambiental de solo o Latossolo, está associada pela ocorrência deste tipo de solo na região e que, como já foi mencionado, em geral, apresentam boa saturação por base. A banda 7 apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia (INPE, 2010). Estas informações podem ser importantes por esta região apresentar uma paisagem bastante heterogênea.

Tabela 4.3.21: Características dos modelos de regressão linear múltipla antes e após a retirada de valores extremos da variável V% da região Serrana.

	V(%) M1 n= 50	V(%) M2 n= 47
Fórmula	85,05 – 0,07*elevação + 0,18*ndvi – 34,9*argissolo - 51,1*latossolo – 0,38*B7 – 0,27*B4 + 0,77*B2 + 15,5* rochas básicas	51.9 + 32.4 * latossolo + 0.10*B7
AIC	304,2	216,4
RMSE	20,5	20,1
Cp	2,87	3,00
R²_{ajust}	0,54	0,58
Prob>F	<0001	0,001
F	7,02	8,64
V% gráfico da predição		

O AIC diminuiu em todos os modelos significativamente. O RMSE também diminuiu em todos os modelos M2, após a retirada de valores extremos. Romano e Santini (1999) utilizaram estes mesmos indicadores para comparar modelos, juntamente com outros índices estatísticos, e comprovaram a boa eficiência do RMSE. Os valores de Cp também diminuíram; como já foi mencionado, isto é importante para que o modelo tenha um melhor ajuste. O M2 foi o modelo escolhido.

4.3.1 _ Resumo da análise de Regressão Linear Múltipla (RLM) nas regiões Norte, Noroeste e Serrana

A tabela, 4.3.1.1, resume o resultado das variáveis ambientais que melhor explicaram a variabilidade das variáveis químicas nas três regiões estudadas. Como podemos observar, as variáveis químicas nas três regiões foram explicadas, em primeiro

lugar, por variáveis relacionadas ao relevo, na maioria dos modelos. O Índice de Umidade foi a variável que mais explicou nas três regiões, principalmente na região Norte, estando presente em quase todos os modelos de RLM, exceto em P(mg.kg).

Na região Norte, das três variáveis ambientais que explicaram a variável pH em água, duas são variáveis de relevo (Perfil de Curvatura e Índice de Umidade). O Perfil de Curvatura, na região, varia entre -7,19 e 10,4, sendo que 53% da área possui áreas côncavas (valores positivos) e 47% são áreas convexas (valores negativos). Souza et al. (2003) afirmam que as variações dos atributos do solo nas diferentes pedoformas estão associadas às formas do relevo, sendo este o principal responsável pelas maiores variações dos atributos do solo. O Índice de Umidade, que possui relação com áreas mais úmidas, está relacionado à área da B aixada Campista que consiste em uma extensa planície deltaica, destacando-se vastos depósitos flúvio-lagunares, ou brejos, no entorno da lagoa Feia. Segundo Embrapa (1979), em áreas muito úmidas, os valores de pH são muito variáveis, podendo ocorrer variações sazonais muito acentuadas especialmente em terrenos periodicamente inundados, pois com o solo saturado de água, o pH eleva-se gradualmente. Porém ao secar, os valores de pH baixam gradativamente, podendo atingir valores de até dois.

Na região Noroeste, CTC (cmol_c.kg) foi explicada por três variáveis de relevo, tais como: Elevação (primeira variável), Aspecto (segunda variável) e Índice de Umidade (terceira variável). A Elevação está associada ao relevo bastante movimentado desta região, com altitudes que variam entre 35 a 680 m. Logo, a Elevação e o Aspecto são atributos importantes que influenciaram a predição da CTC (cmol_c.kg) na região devido às características do relevo.

Na região Serrana as variáveis ambientais como a Elevação explicaram as variáveis químicas pH, C(g/kg) e CTC(cmol_c.kg). Estas variáveis ambientais são importantes na paisagem da região, por possuir um relevo bastante acentuado, escarpado, com cotas acima de 700 metros, podendo atingir cotas acima de 2000 metros e com altas declividades (CIDE, 2010). A região possui 20% da área com declividades acima de 45%, e segundo Embrapa (1979) estas áreas podem ser classificadas como 20% a 45% (fortemente ondulado) e > 45% (relevo montanhoso). A declividade da região influenciou na predição de P(mg.kg) e K⁺(cmol_c.kg) (negativamente). A declividade é um dos fatores que podem

colaborar para a lixiviação de nutrientes como P(mg.kg) e K⁺(cmol_c.kg) nesta região, por isso a correlação negativa entre as variáveis químicas e a variável ambiental Declividade.

Ainda na tabela 4.3.1.1 podemos observar que os tipos de solo também influenciaram a predição das variáveis químicas nas três regiões. Principalmente os Argissolos e os Latossolos. Os Argissolos, por exemplo, que ocupam 64,6% da região, explicaram quatro das variáveis químicas. Na região Noroeste os Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelo, em geral, estão localizados em áreas de morros e montanhas (Lumbreras, et al 2006). Na região Serrana os Latossolos explicaram C (g/kg), CTC (cmol_c.kg), Al(m)% e V%. Os Latossolos são os mais representativos ocupando 28,3% da região (Lumbreras, et al. 2004). Outros solos também foram importantes para explicar a variabilidade das variáveis químicas da região Norte, são eles: os Neossolos que ocupam 10,9% e os Cambissolos, com 7,8% dos solos desta região. Estes solos são encontrados, principalmente, na área de baixada próximo ao Rio Paraíba do Sul (Lumbreras, et al. 2004).

Observando a tabela 4.3.1.1 a litologia não foi tão importante quanto os atributos de terreno e os tipos de solos para explicar a variabilidade das variáveis químicas nas três regiões. Na região Norte as variáveis de litologia estão presentes em todos os modelos de RLM, explicando, na maioria, como a terceira ou quarta variável. A litologia da região Norte, influenciou os modelos de RLM para explicar as variáveis químicas que, principalmente na região de Campos, possui formas alongadas de sedimentos terciários, numa faixa diagonal que atravessa a direção NE-SW, interpondo-se entre os domínios das rochas pré-cambrianas e os Sedimentos Quaternários. As rochas do embasamento cristalino que ocorrem na região são em sua maioria gnaisses, migmatitos e granitos. Na região Noroeste a litologia também influenciou a predição de algumas variáveis químicas, principalmente, para a variabilidade do C(g/kg) na região. A região Noroeste possui dois grandes Domínios litológicos, o Juiz de Fora e o Cambuci. No Domínio Juiz de Fora, predominam rochas ortoderivadas granulíticas; no Domínio Cambuci, sobressai um leucocharnockito e estão presentes, subordinadamente, mármore, gnaisses e migmatitos (Mansur, et al 2006).

As variáveis ambientais relacionadas aos organismos (O do SCORPAN) explicaram, na maioria, C(g/kg) nas três regiões. A variável NDVI explicou C (g/kg) na

região Norte como a primeira variável e nas demais regiões como terceira variável, evidenciando a influência da cobertura vegetal na predição do C(g/kg).

Tabela 4.3.1.1_ Resumo das variáveis explicativas dos modelos de RLM

Variáveis Químicas Variáveis Ambientais	pH em água	P	C	K ⁺	CTC	Al(m)	V(%)
Elevação	NW ³ , S ¹	N ¹	S ¹		NW ¹ , S ¹		NW ¹
Declividade		NW ² , S ¹		S ²		NW ¹	N ¹ , NW ⁴
Aspecto	S ²	NW ¹			NW ²	S ¹	
Plano de Curvatura		N ²					
Perfil de Curvatura	N ¹		NW ¹	S ¹			
Índice de Umidade	N ²	S ²	NW ²	N ¹	N ¹ , NW ³ , S ²	N ¹ , S ²	N ²
NDVI			N ¹ , NW ³ , S ³		NW ⁴		
Banda 7			NW ⁵			NW ⁴	
Banda 4			N ⁶		NW ⁵ , N ⁴		
Banda 2			N ⁷ , NW ⁶				S ²
Argissolo	N ³ , NW ¹ , S ³		N ² , NW ⁴	S ³		NW ² , S ³	N ³ , NW ²
Latosolo	NW ²		N ⁴ , S ²		S ²	N ² , S ³	NW ³ , S ¹
Gleissolo			N ³	N ³	N ³	NW ³	
Organossolo		N ⁴		N ⁴			
Cambissolo				N ²	N ²		
Neossolo		N ³			N ⁴	N ³	
Espodossolo		NW ³					
Gnaisse		S ³					N ⁴
Granito	N ⁴			NW ¹ , N ⁵		N ⁴	N ⁶
Migmatito			NW ⁹				N ⁵
Rochas Básicas				S ⁴			
Sed. Holocênicos			NW ¹⁰			N ⁵	
Sed. Terciários		N ⁶	N ⁵				
Mármore	NW ⁴		NW ⁸	NW ²	NW ⁵		
Granulito		N ⁵	NW ⁷				
Quartzito						NW ⁵	

N – Região Norte
 NW – Região Noroeste
 S – Região Serrana

1ª variável explicativa¹
 2ª variável explicativa²
 3ª variável explicativa³ e assim por diante

4.4 _ Mapeamento Digital da Fertilidade Natural do Solo

A seguir, serão apresentados os mapas das variáveis: pH em água, P, K⁺, C, CTC, Al(m)% e V%, que resultam da adição do resultado da RLM (Regressão Linear Múltipla) e seus resíduos (*regression – kriging*) (Odeh, et al. 1975; McBratney, et al. 2003).

pH em água

A figura 4.4.1 ilustra o mapa final por RLM da variável pH em água (RLM + resíduo), os histogramas (Figura 4.4.1B) e o mapa de resíduos (Figura 4.4.2) das três regiões Norte, Noroeste e Serrana. A Faixa Litorânea, apresenta pH considerado baixo com níveis entre 2,2 e 4,9, médio com níveis entre 4,9 e 5,6 e alto com níveis entre 5,9 e 7,9, segundo a distribuição dos dados deste trabalho (Figura 4.4.1B). Estes níveis são semelhantes aos definidos (baixo, médio e alto) na literatura (Malavolta, 1980). No subdomínio deste geoambiente classificado como Baixada Campista (Lumbreras, et al. 2004), esta região apresenta áreas mais planas da região Norte (Campos dos Goytacazes), apresentam áreas mais ácidas com pH entre 2,2 e 4,9. Este resultado é semelhante ao encontrado por Pereira, et al (1998) em relação do Rio de Janeiro. Teores abaixo de 4,0 são considerados ácidos, segundo a literatura (Malavolta, 1980). Allison (1973), por exemplo, enfatiza que solos ácidos, ou seja, deficientes em cálcio, afetam de forma negativa a fertilidade dos solos. A acidez do solo é um fator importante em estudos (Eldeiry e Garcia 2008; Reinds et al. 2008), que foram focados na degradação e na qualidade do solo. Alguns produtos agrícolas, importantes para a economia do Estado do Rio de Janeiro, são produzidos neste domínio, em particular, a cana-de-açúcar, considerado ainda um dos cultivos mais expressivos da região Norte. A cana-de-açúcar, por exemplo, é bastante tolerante à acidez do solo, mas o ideal para o desenvolvimento adequado, seria ter um pH em torno de 6,5 (Marin, 2010). No mapa de resíduo (Figura 4.4.2), as áreas de maior incerteza coincidem com as dos maiores teores do pH na região Norte.

Observando ainda, a figura 4.4.1A nota-se que algumas áreas dos geoambientes Norte-Noroeste Fluminense e do Planalto do Alto Itabapuana, que abrange todo o Noroeste e parte da região Norte, têm uma distribuição de pH dentro da faixa considerada média para a região Noroeste que apresenta níveis entre 5,7 e 6,1 e a região Norte que apresenta níveis

entre 4,9 e 5,6, segundo os dados obtidos (Figura 4.4.1B). A maior parte da região possui um pH médio, correspondendo a 80% do geoambiente Norte-Noroeste Fluminense. A extensa região dominada por colinas e morros baixos possui Argissolos Vermelho-Amarelos e Vermelhos eutróficos, com moderada fertilidade natural. Esses solos são considerados bons para agricultura, mas com características ácidas. Esta região possui deficiência hídrica prolongada e relevo bastante movimentado, constituindo assim, importantes fatores limitantes às atividades agrícolas (Dantas, et al 2001). Issaka et al (1997) verificaram que a distribuição do pH dos solos tropicais da África Ocidental mostra que a maioria dos valores variam 5,5 e 6,0. Este resultado foi semelhante com os resultados do presente estudo, onde 80% da variabilidade do pH, no domínio Norte-Noroeste Fluminense, está entre 5,7 e 6,1. Os municípios da região Noroeste como Miracema, Santo Antônio de Pádua e Lage do Muriaé apresentaram pH entre baixo e médio. Miracema, por exemplo, possui uma produção agrícola voltada, principalmente, para o tomate, maracujá, coco verde e aipim (CIDE, 2005). Segundo Alvarez et al (2002), para que o tomateiro possa absorver o máximo de nutrientes, o pH do solo deve estar entre 5,0 e 7,0. A faixa deste pH não corrobora o município de Miracema que apresenta pH entre 4,9 e 5,7, apresentando um solo bastante ácido para a cultura do tomate. No mapa de resíduo (Figura 4.4.2), as áreas de maior incerteza, em sua maior parte, coincidem com os médios teores do pH na região Noroeste.

A figura 4.4.1A ilustra a variabilidade do pH na região dos geoambientes do Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos, onde está inserida a região Serrana e parte da região Norte que abrange uma pequena área de Campos e São Fidélis. No reverso desta escarpa serrana, existem algumas zonas planálticas, de relevo montanhoso, o planalto reverso da Região Serrana e a Serra do Desengano (Dantas, et al. 2001). No mapa de resíduo (Figura 4.4.2), as áreas de maior incerteza, em sua maior parte, coincidem com baixos teores do pH na região Serrana. Esta região apresenta pH considerado, segundo os dados deste trabalho, níveis baixos de pH entre 3,9 e 5,2, esses níveis estão concentrados mais precisamente na região Serrana. O pH considerado médio possui níveis entre 5,2 e 5,9, cerca de 55% dos domínios serranos possui pH médio. Observando o mapa da variabilidade do pH (Figura 4.4.1A), verifica-se que o município de Cantagalo e São Sebastião do Alto, no domínio Planalto da região Serrana, apresenta uma concentração de

pH médio. Estes dois municípios possuem uma agricultura ativa, Cantagalo, por exemplo, tem como um dos principais cultivos banana, jiló e pimentão (CIDE, 2005). A localidade que abrange a região Norte, mais precisamente no município de São Fidélis, o pH está entre 5,6 e 7,9, podendo ser considerado um pH entre ácido e básico. A região Serrana possui uma pluviosidade considerada elevada, com cerca de 1500 mm a 2500 mm/ano, que segundo Lopes (1998), a acidez do solo é comum em regiões onde a precipitação é, suficientemente, elevada onde ocorre a lixiviação em quantidades apreciáveis de bases permutáveis (como o cálcio e o magnésio). Eles podem ser substituídos por elementos acidificantes como o hidrogênio, o manganês e o alumínio. Assim sendo, em geral, os solos formados sob condições de alta pluviosidade são mais ácidos do que aqueles formados sob condições áridas.

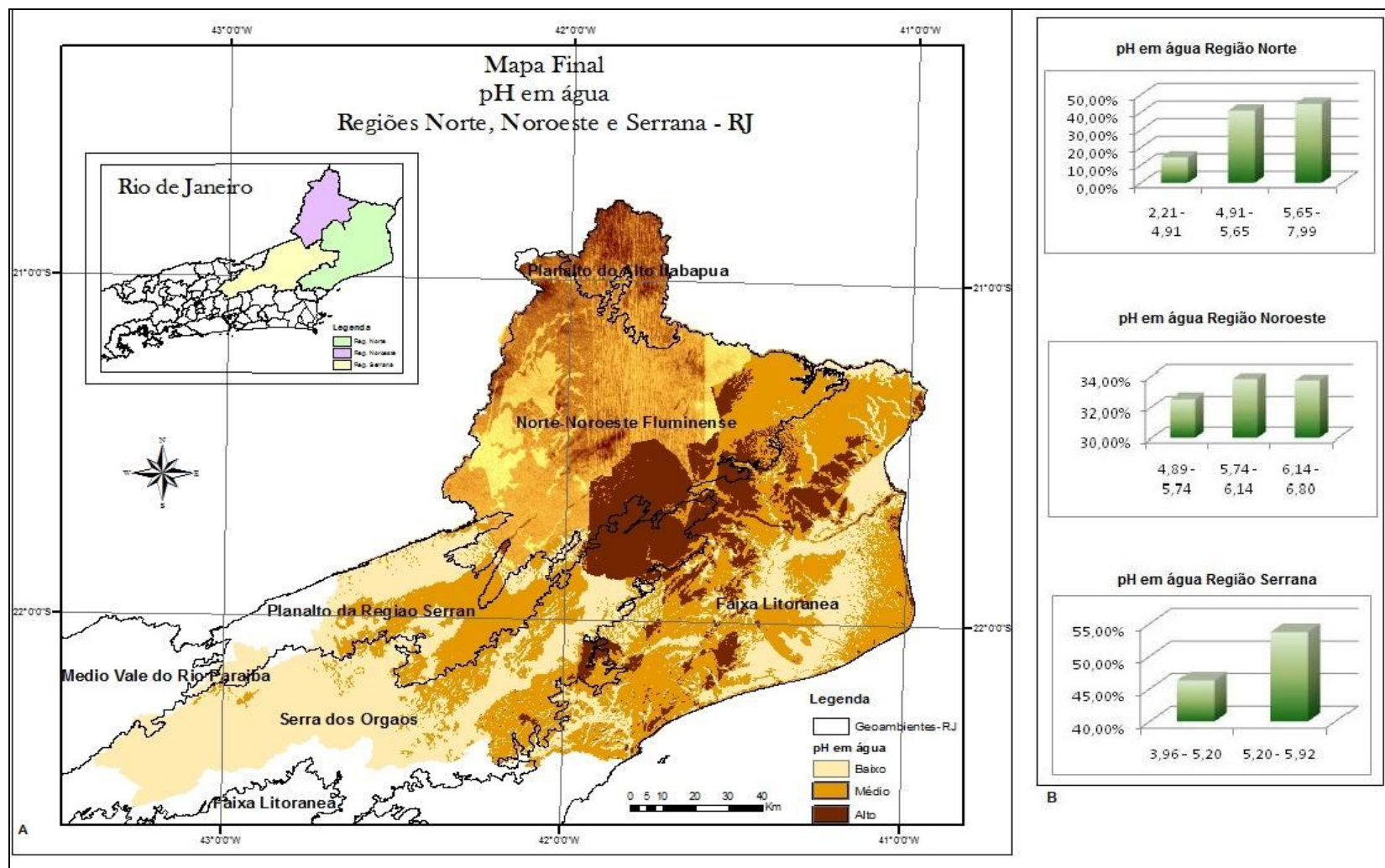


Figura 4.4.1: Mapa (Regressão + Krigagem) pH em água Regiões Norte, Noroeste e Serrana(A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B). Geoambientes (CPRM-RJ, 2001).

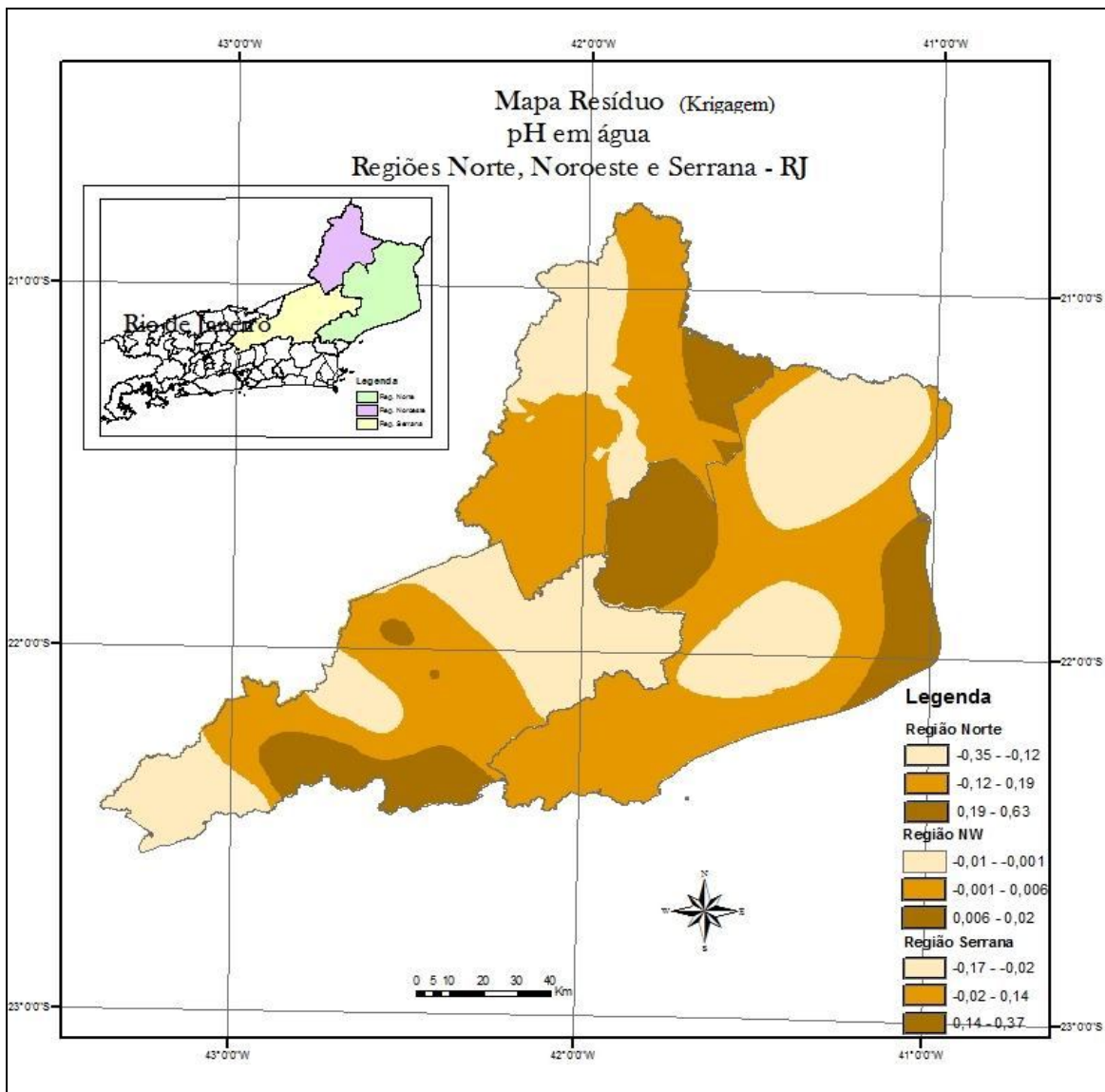


Figura 4.4.2: Resíduos (kigagem) resultado dos modelos de RLM da variável pH em água.

Potássio

A figura 4.4.3A ilustra o mapa final de K^+ ($\text{cmol}_c.\text{kg}$), (RLM + resíduo), os histogramas (Figura 4.4.3B) e o mapa de resíduos (Figura 4.4.4) para a região Norte, Noroeste e Serrana. No mapa de resíduo (Figura 4.4.4), apresenta poucas áreas de maior incerteza nas três regiões. Observando a figura 4.4.3A nota-se que o domínio que compreende a Faixa Litorânea, e que a região Norte ocupa quase que totalmente este compartimento, possui valores de K^+ ($\text{cmol}_c.\text{kg}$), segundo dados deste trabalho, considerados baixos com níveis entre 0,3 e 0,4(cmol_c/kg), ocupando 78% da região Norte (Figura 4.4.3B) e 60% deste domínio. Mas, existem áreas menores com valores medianos com índices entre 0,4 e 0,7(cmol_c/kg), com 22% da região Norte e com 15% neste domínio. Valores considerados altos apresentam níveis entre 0,7 e 1,0($\text{cmol}_c.\text{kg}$); são apenas 0,04% na região (Figura 4.5.3B) Norte e 0,03% no compartimento. Na literatura, por exemplo, segundo Almeida (1988) para que os teores de potássio trocável sejam ideais para a maioria das plantas o potássio deve ser maior que 0,23 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$). Logo, pode-se avaliar que a Faixa Litorânea possui uma variabilidade de K^+ ($\text{cmol}_c.\text{kg}$) (Figura 4.4.3B) propícia ao crescimento da maioria das plantas, por possuir níveis de K^+ acima de 0,23 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$). O potássio também é importante para a manutenção da quantidade de água nas plantas. A absorção de água pela célula e pelos tecidos (Hsiao e Läuchli, 1986). O Norte do Estado do Rio de Janeiro apresenta potencial para o desenvolvimento da fruticultura. A fruticultura da Região é baseada, principalmente, na cultura do abacaxi, coco, goiaba e maracujá, que, de acordo com IBGE (2008) em 2006, estes cultivos ocupavam uma área de 3.095 hectares, 2.252 ha, 137 ha e 257 ha, respectivamente. O potássio possui efeitos benéficos no metabolismo de plantas frutíferas, tais como o maracujá, a goiaba e entre outras, como ativador enzimático e na translocação de carboidratos para os frutos (Marschner, 1995).

Fazem parte do domínio geoambiental do Norte-Noroeste Fluminense e o Planalto do Alto Itabapua (Figura 4.4.3A), a região Noroeste e parte da região Norte (municípios de Cardoso Moreira, São Fidélis e Campos). Na parte mais ao noroeste deste domínio, a variabilidade de K^+ (cmol_c/kg) foi considerada entre níveis medianos e altos (segundo dados deste trabalho). Observando a figura 4.4.3B nota-se que os níveis de K^+ ($\text{cmol}_c.\text{kg}$)

estão entre 0,7 e 1,4 (cmol_c.kg) esses níveis ocupam 36% da região Noroeste. E os níveis considerados altos, possuem uma faixa entre 1,4 e 2,2 (cmol_c.kg) e ocupa 35% da região Noroeste. A região que compreende a região Norte, do domínio Norte-Noroeste Fluminense, apresenta níveis baixos de K⁺ entre 0,3 e 0,4(cmol_c.kg), níveis médios entre 0,4 e 0,7(cmol_c/kg) e níveis altos entre 0,7 e 1,0 (cmol_c.kg) (Figura 4.4.3B). De um modo geral, esses dois domínios geoambientais possuem, segundo a literatura, níveis adequados de K⁺ (cmol_c.kg) para o desenvolvimento das plantas. Existe uma grande perda de nutriente ocasionada pela erosão do solo. No entorno de Miracema (Região Noroeste) e próximos à localidade de Morro do Coco, são encontrados solos mais desenvolvidos e lixiviados (Latosolos Vermelho-Amarelos distróficos e Argissolos Vermelho-Amarelos latossólicos), sugerindo uma condição de maior umidade nessas áreas subordinadas (Dantas, et al. 2001). A maior troca de potássio ocorre na camada superficial do solo, onde a planta obtém boa parte desse nutriente. E, em regiões em que os solos sofrem a perda de nutrientes por lixiviação, o processo de reciclagem poderá ser prejudicado (Barthold, et al. 2008).

No domínio geoambiental que corresponde o Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos (Figura 4.5.3A), os níveis de K⁺(cmol_c.kg) estão entre baixo e médio, segundo os dados deste trabalho. Na região Norte, a área que compreende os municípios de São Fidélis e Campos (10% deste domínio) possui níveis baixos entre 0,3 e 0,4(cmol_c.kg) e níveis médios entre 0,4 e 0,7(cmol_c.kg). Observando o histograma (Figura 4.5.3B) da região Serrana, que está inserida nestes domínios geoambientais, verifica-se que os níveis considerados baixos, segundo os dados deste trabalho de K⁺, estão entre 0,09 e 1,8 (cmol_c.kg) que correspondem a cerca de 40% da região Serrana, e os níveis considerados médios, estão entre 1,8 e 3,7(cmol_c.kg) da mesma região. Os níveis, considerados altos nesta região, estão entre 3,6 e 15,3(cmol_c.kg), correspondendo apenas cerca de 10% da região Serrana (Figura 4.4.3B). No domínio da Serra dos Órgãos, os municípios de Petrópolis e Teresópolis possuem valores considerados altos de K⁺(cmol_c.kg). O município de Teresópolis, por exemplo, no setor primário, a horticultura é responsável por 90% da produção agrícola no município. A região Serrana é grande produtora de hortaliças, entre elas: alface, agrião, couve, brócolis, entre outras (CIDE, 2005). O potássio é um importante

nutriente para as hortaliças. Ele aumenta a resistência natural da parte aérea das plantas às doenças fúngicas, às pragas, ao acamamento, além de contrabalançar o efeito do excesso de adubação por nitrogênio. No entanto, o excesso de potássio desequilibra a nutrição das hortaliças, dificultando a absorção de cálcio e magnésio (Malavolta, 1980).

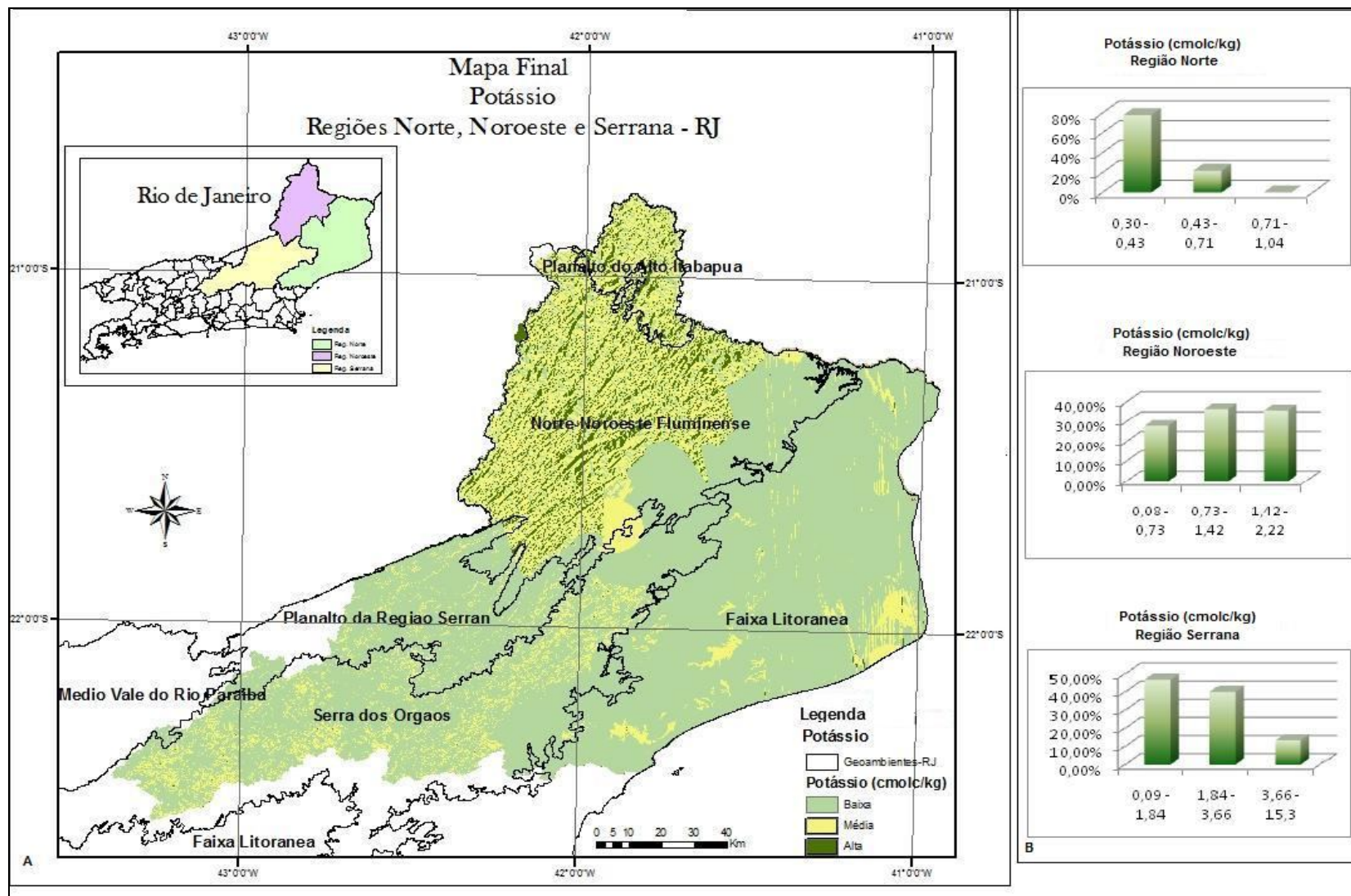


Figura 4.4.3: Mapa (Regressão + Krigagem) Potássio (K^+) Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B). Geoambientes (CPRM-RJ, 2001).

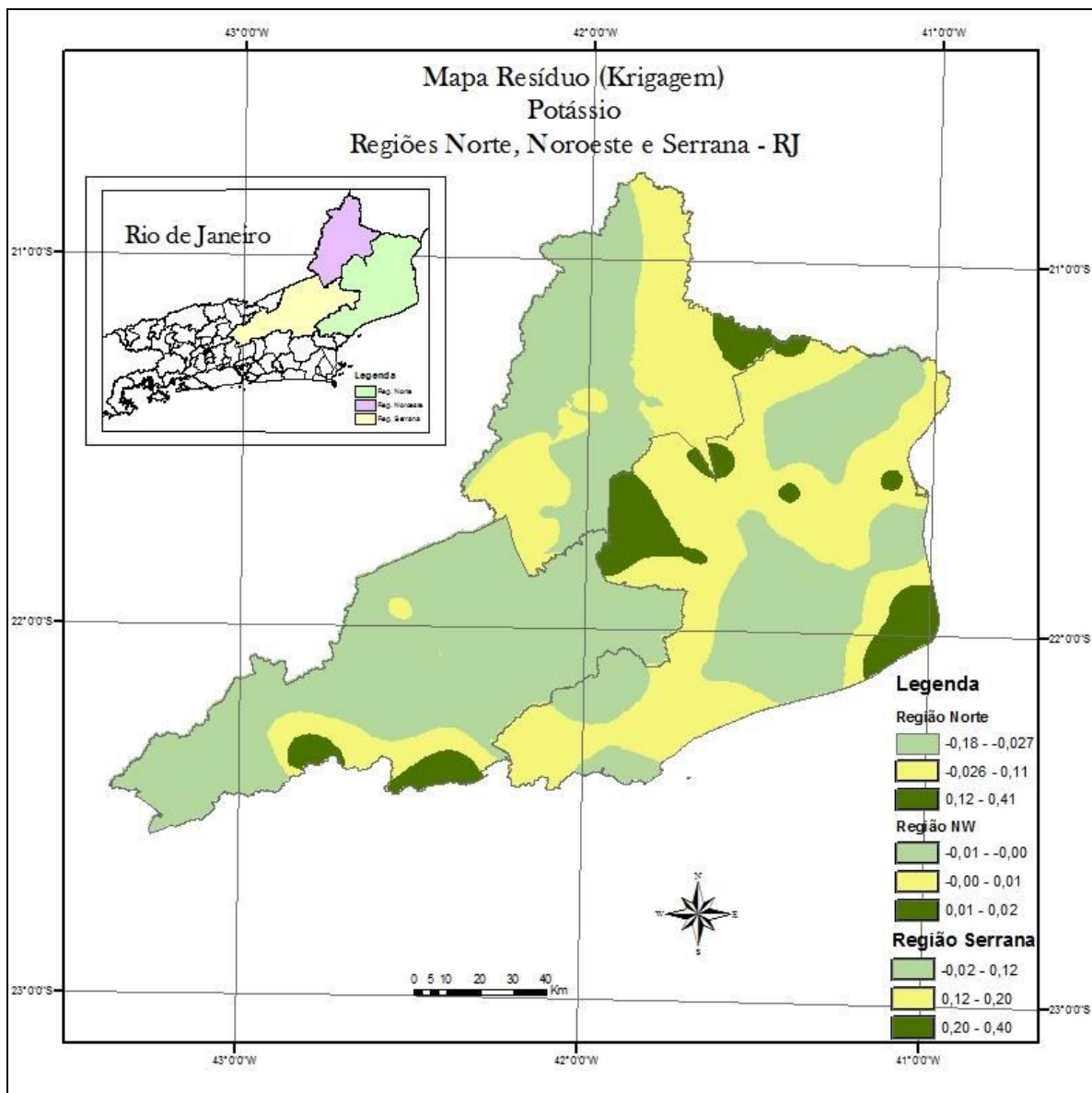


Figura 4.4.4: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Potássio.

Fósforo

A figura 4.4.5A ilustra o mapa final de P (mg.kg), (RLM + resíduo), os histogramas (Figura 4.5.5B) e o mapa de resíduos (Figura 4.4.6) para a região Norte, Noroeste e Serrana. No mapa de resíduo (Figura 4.4.6), as áreas de menor incerteza, em sua maior parte, coincidem com baixos teores de fósforo na região Norte. Observando a figura 4.4.5A, verifica-se que o domínio geoambiental que compreende a Faixa Litorânea, possui níveis de P (mg.kg), considerados, segundo os dados deste trabalho, baixo com níveis entre 1,1 e 3,0 (mg.kg), médio com níveis entre 3,0 e 4,8 (mg.kg) e alto com níveis entre 4,8 e 6,6 (mg.kg) (Figura 4.5.5B). As áreas que possuem maiores níveis de P (mg.kg) estão localizadas nos ambientes próximos ao rio Paraíba do Sul, no município de São Francisco de Itabapuaana, São João da Barra e a Baixada Campista. E, são nestes ambientes, onde também foram encontrados menores valores de pH. Para alguns autores (Parfitt, 1978; Haynes, 1984) adsorção de fósforo pelo solo, em geral, ocorre para baixos valores de pH. Os níveis mais baixos de P (mg.kg) estão na maior porção deste domínio, ocupando 80% da região Norte. Estas concentrações são consideradas baixas para o desenvolvimento de culturas. Segundo Almeida (1988), o teor adequado de fósforo para o desenvolvimento da maioria das culturas é maior de 20 (mg.kg). O fósforo (P) é um dos macronutrientes mais exigidos pelas plantas; entretanto, é o que, com mais frequência, tem limitado a produção agrícola em condições dos solos brasileiros (Novais e Smyth, 1999). A baixa disponibilidade de fósforo nos solos tropicais, provavelmente, é decorrente dos seus baixos teores, da baixa solubilidade dos compostos de fósforo e da sua imobilização devido às fortes interações que apresenta com os constituintes destes solos (Rolim Neto et al., 2004).

No domínio geoambiental Norte-Noroeste Fluminense e no Planalto do Alto Itabapuaana (Figura 4.4.5A), P(mg.kg) apresenta níveis, em sua maioria, entre baixo e médio, segundo os dados deste trabalho. No mapa de resíduo (Figura 4.4.6), as áreas de maior incerteza, em sua maior parte, coincidem com médios e altos teores de fósforo na região Noroeste. Na região Noroeste, por exemplo, a região inserida nestes domínio, os níveis de P(mg.kg) são, em sua maioria, valores medianos, com níveis entre 2,67 e 3,9

(mg.kg) (Figura 4.4.5B). Valores considerados baixos são encontrados na região Norte, mais precisamente, em partes dos municípios de São Fidélis, Cardoso Moreira e Campos, apresentando níveis de P entre 1,15 e 2,97(mg.kg) com 10 % neste domínio. De modo geral, esses níveis de P(mg.kg) encontrados neste geoambiente, estão abaixo do considerado adequado para as plantas, segundo a literatura. Estão dentro do nível médio apenas 0,3% de toda a região, mais precisamente na região Noroeste (Figura 4.4.5B), que segundo Almeida (1988) os níveis de fósforo considerados médios estão entre 11 e 20(mg.kg). Observando a Figura 4.5.5B, nota-se que existem alguns níveis de fósforo que chegam a 15(mg.kg) na região Noroeste. O fósforo (P) é o nutriente mais limitante da produtividade de biomassa em solos tropicais (Novais e Smyth, 1999). A cafeicultura é uma atividade marcante no Planalto do Alto Itabapuana, mais precisamente, no município de Varre-Sai (Dantas, et al 2001). A baixa fertilidade química do solo, quando relacionada ao fósforo, pode prejudicar a produção do café (Pozza, et al. 2002). Quando esse nutriente encontra-se ausente no substrato, o sistema radicular apresenta-se pouco desenvolvido, especialmente as raízes secundárias, reduzindo a capacidade de absorção de água e nutrientes, o que poderá ser limitante ao desenvolvimento da planta (Malavolta, 1980).

O domínio do Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos (Figura 4.4.5A) possui níveis de P(mg.kg), segundo dados deste trabalho, baixos, principalmente, na região Serrana com níveis entre 0,01 e 0,98(mg.kg), quase 50% dos dados da região (Figura 4.4.5B). No mapa de resíduo (Figura 4.4.6), as áreas de maior incerteza, em sua maior parte, coincidem com médios e altos níveis de fósforo na região Serrana. Na região Serrana, encontra-se níveis medianos entre 0,98 e 1,63 (mg.kg), com 40% dos dados. Níveis considerados altos estão entre 1,63 e 5,76(mg.kg) (Figura 4.4.5B). Segundo a literatura, de um modo geral, estes valores não atingem os níveis exigidos pelas plantas. Os municípios que possuem níveis considerados mais altos neste domínio são Petrópolis, Teresópolis e Santa Maria Madalena. Petrópolis e Teresópolis apresentam solos pouco espessos e lixiviados (Cambissolos e Latossolos Vermelho-Amarelos álicos) (Dantas, et al 2001). Os Latossolos, por exemplo, têm alto poder de adsorção de fósforo (Leal, 1971; Novais et al., 1991). A adsorção de fósforo é o processo pelo qual formas solúveis de fósforo, através de ligações eletrostáticas ou covalentes, com formação de compostos insolúveis, tornam-se

indisponíveis para as plantas (Aquino, 2004). Dentre os principais fatores que influenciam a adsorção de fósforo no solo, estão o pH, o teor de alumínio trocável e a matéria orgânica (Moreira et al. 2006) . As regiões do domínio geoambiental, que compreende parte da região Norte (municípios de São Fidélis e Campos), possuem níveis baixos entre 1,15 e 2,97(mg.kg) (Figura 4.4.5B).

Os solos brasileiros são carentes de fósforo, em consequência do material de origem e da forte interação deste nutriente com o solo (Raij, 1991), em que menos de 0,1% encontra-se em solução (Fardeau, 1996). A degradação do solo e as preocupações ambientais foram abordadas em estudos relacionados ao mapeamento digital de solos focado no enriquecimento de nutrientes, tais como fósforo (Grunwald et al., 2008; Grunwald e Reddy, 2008). A elevação dos teores de matéria orgânica no solo pode favorecer a solubilização do fósforo, principalmente pelo aumento da atividade biológica (Raij, 1981).

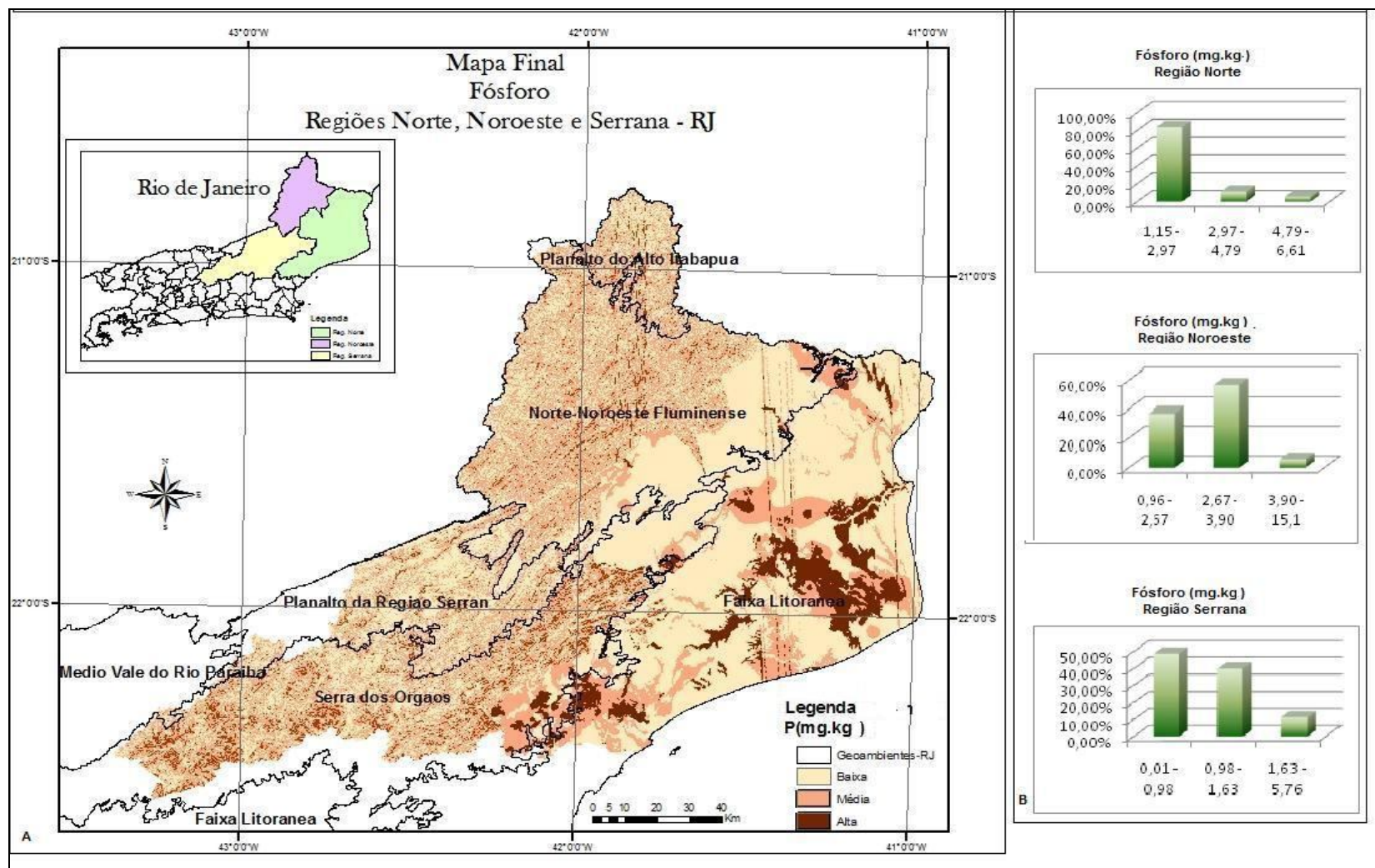


Figura 4.4.5: Mapa (Regressão + Krigagem) Fósforo Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B). Geoambientes (CPRM-RJ, 2001).

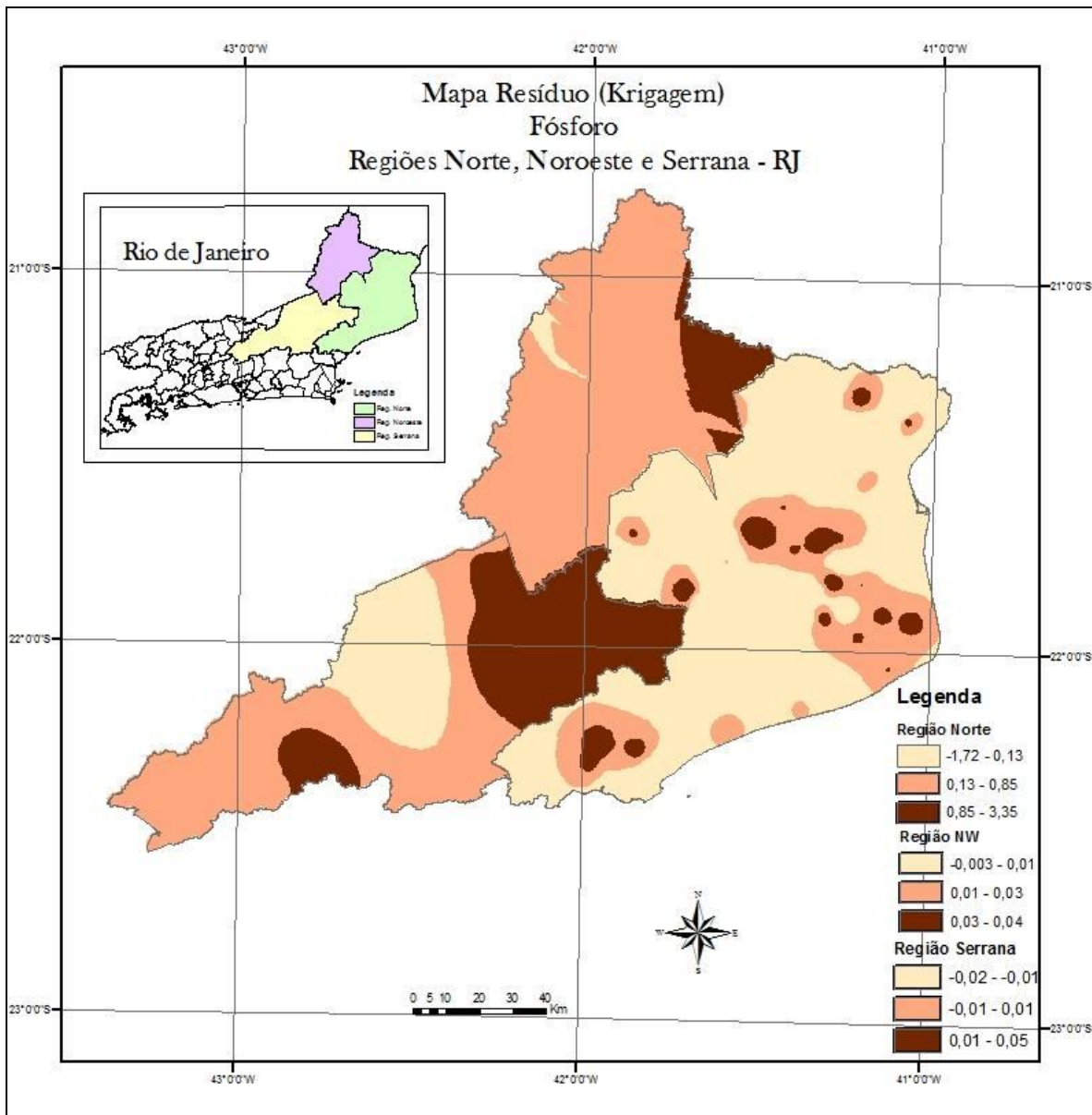


Figura 4.4.6: Resíduos (krigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Fósforo.

Carbono

A figura 4.4.7A ilustra o mapa da variabilidade do C (g/kg) por RLM + resíduo, a figura 4.5.7B ilustra os histogramas e a figura 4.4.8 ilustra o mapa de resíduos das três regiões Norte, Noroeste e Serrana. No mapa de resíduo (Figura 4.4.8), as áreas de maior incerteza, ocupam a maior parte nas três regiões. Observando a figura 4.4.7A, nota-se que a Faixa Litorânea, possui níveis de C entre 11 e 25(g/kg), que foram considerados baixos segundo os dados deste trabalho; níveis médios entre 25 e 31(g/kg) e níveis altos entre 31 e 51(g/kg). Segundo Tomé Jr.(1997), os níveis adequados de Carbono, para o desenvolvimento da maioria das plantas, estão acima de 23(g/kg) e os valores medianos estão entre 11 e 23(g/kg). Observando os dados da região Norte (Figura 4.5.7B), nota-se que mais 60% da região possuem dados de Carbono acima de 23(g/kg). Os maiores valores de Carbono, deste domínio geoambiental, estão espacialmente bem distribuídos, e as áreas mais baixas, próximo a rios e lagoas que apresentam concentrações bem características de regiões deposicionais. A Baixada Campista, por exemplo, apresenta os maiores níveis de C(g/kg). Esta região consiste em diversos ambientes deposicionais, como lagoas e brejos. Mendonça-Santos, et al (2007) identificaram em seu trabalho, no Estado do Rio de Janeiro, maiores níveis de carbono orgânico, na Faixa Litorânea em ambientes de baixada, tais como nas proximidades da Lagoa Feia, na Baixada Campista. Estes resultados corroboram os resultados do presente trabalho.

No compartimento Norte-Noroeste Fluminense e o Planalto do Alto Itabapuana, são muito semelhantes em relação a variabilidade do C(g/kg) (Figura 4.4.7A). A região apresenta valores baixos, médios e altos, segundo dados deste trabalho. Por exemplo, a região Noroeste possui níveis baixos de Carbono entre 9,5 e 24(g/kg), níveis médios entre 25 e 32(g/kg) e níveis altos entre 32 e 50(g/kg); 70% dos dados da região Noroeste estão acima de 23(g/kg) (Figura 4.4.7B). Esses valores são considerados bons para o desenvolvimento da planta, segundo a literatura. Na região Norte, também inserida neste domínio, apresenta valores de C(g/kg) entre baixo (11 e 25 g/kg) e médios (25 e 31 g/kg); esses dados também corroboram a literatura, quando classificados como baixo e médio. O

domínio Norte-Noroeste Fluminense apresenta um extenso relevo colinoso, seccionado por freqüentes alinhamentos serranos de direção estrutural WSW-ENE e maciços montanhosos, cujo cenário é também marcado por pastagens sub-aproveitadas. A mata atlântica também foi devastada para implantação da monocultura cafeeira, já no início do século XX (Dantas, 2001). O manejo inadequado e a erosão do solo podem afetar sua estrutura, provocar a redução da matéria orgânica e, conseqüentemente, a redução do carbono no solo. Segundo Cruz et al. (2003), a estabilidade da estrutura depende da matéria orgânica, verificando-se menor risco de degradação estrutural e de compactação em solos com maiores teores de carbono orgânico presentes no solo.

O domínio geoambiental Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos apresentam diferenças na variabilidade do Carbono (Figura 4.4.7A). Cerca de 30% dos dados (Figura 4.4.7B) apresentam níveis considerados médios entre 9,8 e 16 (g/kg), segundo dados deste trabalho. A Serra dos Órgãos possui níveis de C(g/kg) considerados baixos entre 0,01 e 9,8 (g/kg) e níveis altos entre 16 e 31(g/kg). Os níveis considerados altos são apenas 8% dos dados neste domínio. E, somente 4% dos dados estão acima de 23(g/kg). Segundo os dados deste trabalho e com referência na literatura, o compartimento Serra dos Órgãos pode ser avaliado como uma região com níveis de C(g/kg) entre baixo e médio. O domínio do Planalto da Região Serrana, que abrange localidades, como São José do Vale do Rio Preto, Duas Barras, Carmo, Cantagalo, Cordeiro e São Sebastião do Alto, consiste, predominantemente, de morros elevados e, subordinadamente, por colinas e morros baixos. Existe certa redução de umidade nestes terrenos, em direção a norte e a leste, marcada pela diferenciação de solos e da cobertura florestal original. Os níveis considerados médios de carbono, segundo dados deste trabalho, abrangem esta região do compartimento, e que pode estar associado à paisagem que apresenta uma cobertura vegetal bastante expressiva. Segundo Dalal e Mayer (1986) os solos sob mata apresentaram maior conteúdo de carbono orgânico.

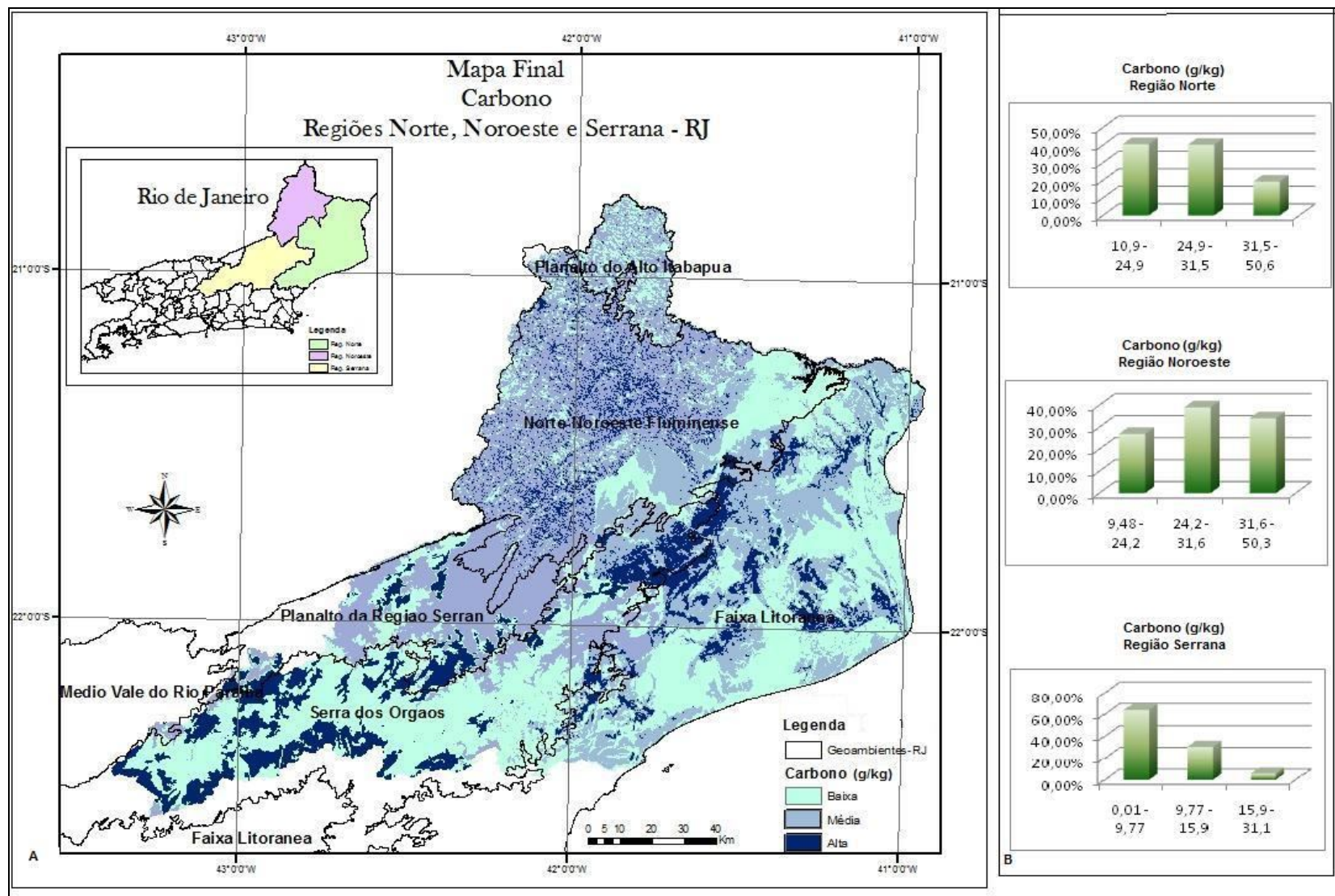


Figura 4.4.7: Mapa (Regressão + Krigagem) Carbono Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B). Geoambientes (CPRM-RJ, 2000).

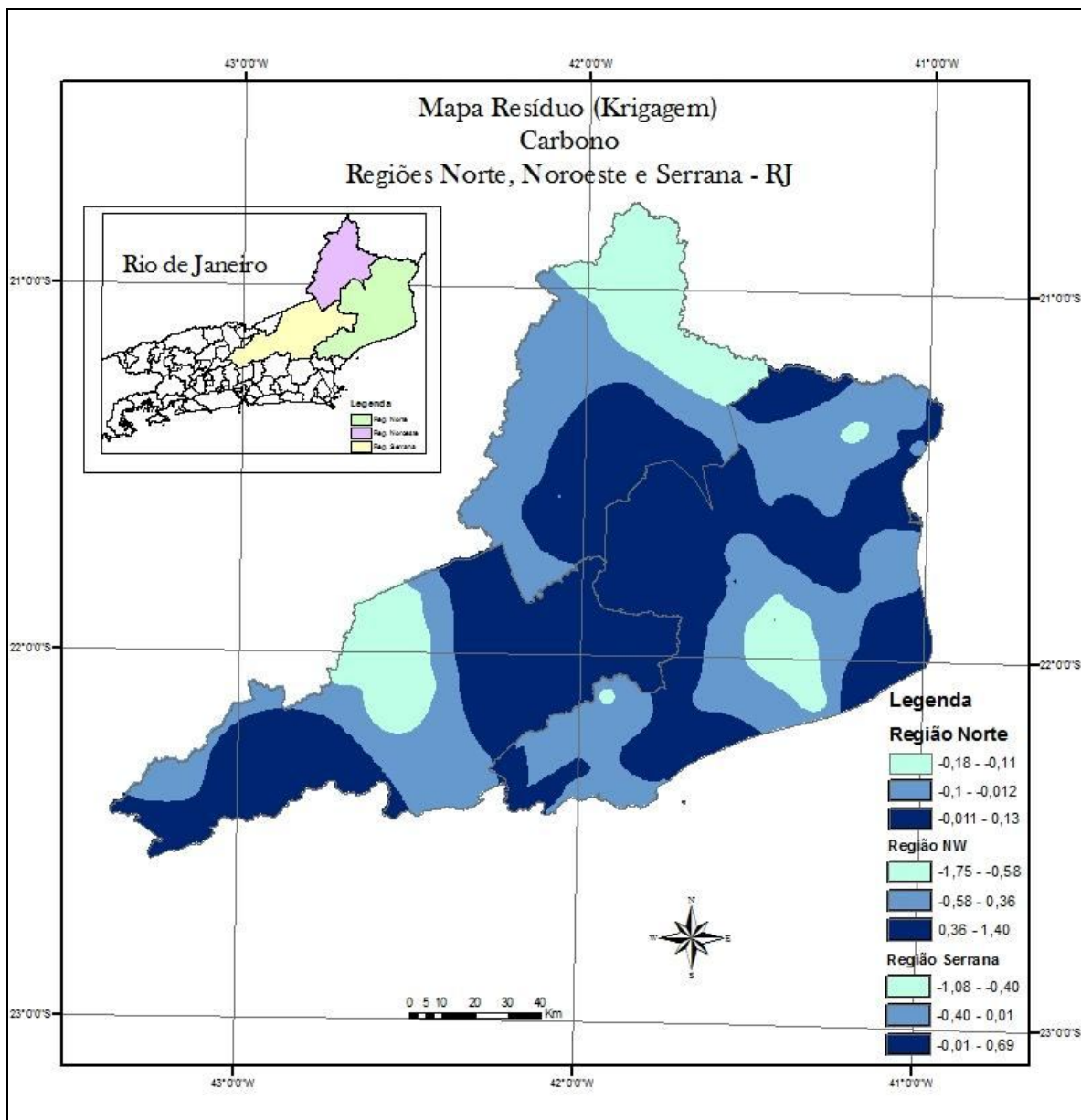


Figura 4.4.8: Resíduos (kigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Carbono.

Capacidade de Troca Catiônica

A figura 4.4.9A ilustra o mapa final de CTC ($\text{cmol}_c.\text{kg}$), (RLM + krigagem), os histogramas (Figura 4.5.9B) e o mapa de resíduos (Figura 4.4.10) da distribuição para a região Norte, Noroeste e Serrana. No mapa de resíduo (Figura 4.4.10), as áreas de média incerteza, ocupam a maior parte nas três regiões, que coincidem com os médios níveis de CTC. Observando a figura 4.4.9A, nota-se que o compartimento geoambiental da Faixa Litorânea apresenta, nas áreas da Baixada Campista, uma maior concentração dos níveis considerados altos de CTC entre 19,4 e 42 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$); ocupam uma pequena porção da região da Baixada Campista (5%). Os teores considerados bons para as plantas estão acima de 8,61 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$), mas os valores ótimos são acima de 15 $\text{cmol}_c.\text{kg}$ (Tomé Jr, 1997), o que corresponde a uma área 0,1% da região Norte. Os níveis considerados médios de CTC estão entre 10 e 19 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$) e ocupam somente na região Norte 38% e no domínio da Faixa Litorânea 20%. Os baixos níveis de CTC estão entre 1,6 e 10 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$); esses dados ocupam 40% da Faixa Litorânea e na região Norte 54% (Figura 4.5.9B). As regiões que apresentam maior nível de CTC estão associadas aos Gleissolos e aos Cambissolos. Os Gleissolos, em geral, possuem um acúmulo de matéria orgânica (importante para a manutenção de uma boa CTC); ocorrem em relevo plano, ao longo das várzeas, nas regiões litorâneas, planícies costeiras e delta do Rio Paraíba do Sul. Os Cambissolos, no Estado do Rio de Janeiro, podem ser desenvolvidos a partir de sedimentos aluviais e colúviais, em relevo plano e pode ter, em alguns casos, um caráter álico. Situados nas planícies costeiras e no delta do Rio Paraíba do Sul, em geral, existe uma maior fertilidade natural (Almeida, 1988).

No Norte-Noroeste Fluminense existe áreas com baixa, média e alta CTC ($\text{cmol}_c.\text{kg}$) (Figura 4.4.9A). As áreas que possuem CTC mais baixas (entre 1,6 e 10 $\text{cmol}_c.\text{kg}$) estão localizadas na região Norte, mais precisamente, em partes dos municípios São Fidélis, Cardoso Moreira e Campos. Na região Noroeste, inserida neste compartimento, os municípios de Cambuci e Lage do Muriaé apresentam níveis considerados altos de CTC (entre 30 e 51 $\text{cmol}_c.\text{kg}$). Os valores medianos fazem parte da maior porção da região Noroeste, com 40% da região (Figura 4.4.9B). No compartimento do Planalto do Alto

Itabapuana, existe uma maior concentração de níveis de CTC ($\text{cmol}_c.\text{kg}$), mais precisamente nos municípios de Varre-Sai e Porciúncula, que segundo a literatura, esses valores são considerados adequados para o desenvolvimento da planta. A região que possui os maiores níveis de CTC foram classificadas como o macropedoambiente 3, segundo Lumbreras, et al (2004), onde predominam Latossolos Vermelho-Amarelos, que ocorrem nos interflúvios aplainados e de conformação convexa, e Argissolos Vermelho-Amarelos, situados, preferencialmente, nos patamares de nível inferior no relevo, além de regiões onde ocorrem os Cambissolos. Os Latossolos Vermelho-Amarelo, por exemplo, possuem, em geral, CTC com níveis entre baixos e médios. E ocorrem em quase todas as regiões do Estado do Rio de Janeiro, em relevo ondulado a fortemente ondulado (Almeida, 1988).

O domínio Serra dos Órgãos (Figura 4.4.9A) apresenta níveis de CTC considerados altos, para os dados deste trabalho, entre 8,1 e 17 $\text{cmol}_c.\text{kg}$ e estão mais concentrados no sul do município de Petrópolis, ao sul de Teresópolis e ao norte de Nova Friburgo. Os valores medianos dos níveis de CTC entre 5,5 e 8,1 $\text{cmol}_c.\text{kg}$ ocorrem em 20% dos dados no domínio. Os níveis considerados baixos estão na porção Norte, nos municípios de São Fidélis e Campos. No compartimento do Planalto da Região Serrana, existem muitas áreas com níveis de CTC($\text{cmol}_c.\text{kg}$) baixos, cerca 30% dos dados. Neste mesmo domínio, os municípios de Cantagalo, Carmo, São Sebastião do Alto e Bom Jardim apresentaram níveis de CTC entre 8,1 e 17 $\text{cmol}_c.\text{kg}$ (Figura 4.4.9B), considerados altos, segundo os dados deste trabalho. Estes resultados corroboram a literatura onde a CTC, adequada ao desenvolvimento das plantas, deve estar acima de 8,6 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$). Os níveis considerados médios e altos nestes compartimentos estão associados a solos do tipo Cambissolo e Latossolo (Lumbreras, et al. 2004). Os Cambissolos, no Estado do Rio de Janeiro, podem ser desenvolvidos a partir de rochas, em relevo forte-ondulado a montanhoso, podendo apresentar em regiões de interiores de vales uma boa fertilidade dos solos (Almeida, 1988). Mas, os Latossolos, em virtude da mineralogia, em geral, apresentam, segundo Almeida (1988) uma CTC mais baixa (inferiores a 13 $\text{cmol}_c.\text{kg}$) e para os resultados deste trabalho não foram considerados baixos, mas que corroboram Tomé Jr. (1997) que define CTC adequada acima de 8,6 ($\text{cmol}_c.\text{kg}$). Estes solos podem ocorrer em relevo suavemente ondulado e fortemente ondulado (característico da região em estudo). A CTC é de grande

importância, no que diz respeito à fertilidade do solo, uma vez que indica a capacidade total de retenção de cátions, os quais irão tornar-se disponíveis às plantas (Chaves et al, 2004).

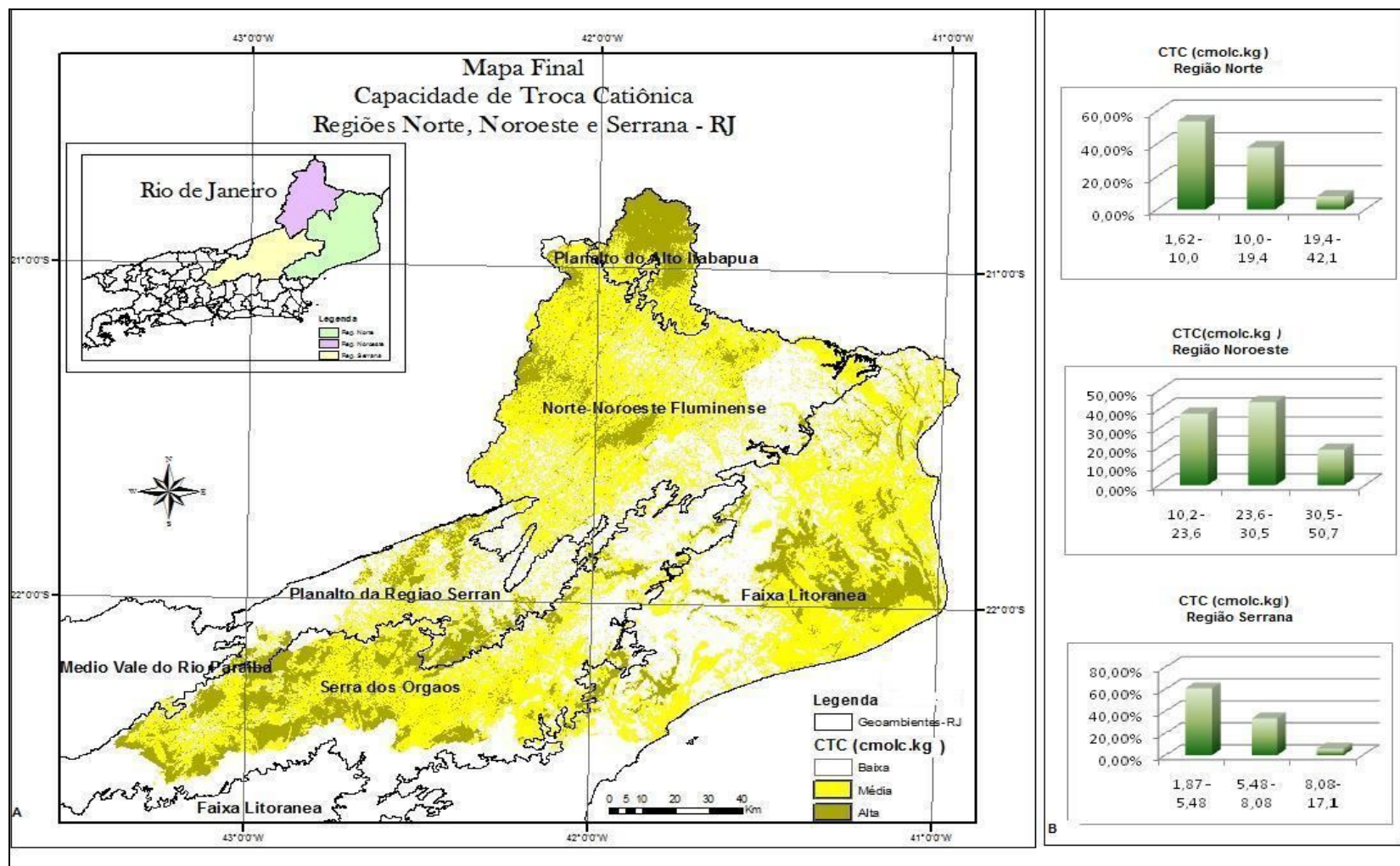


Figura 4.4.9: Mapa (Regressão + Krigagem) CTC Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B). Geoambientes (CPRM-RJ, 2000).

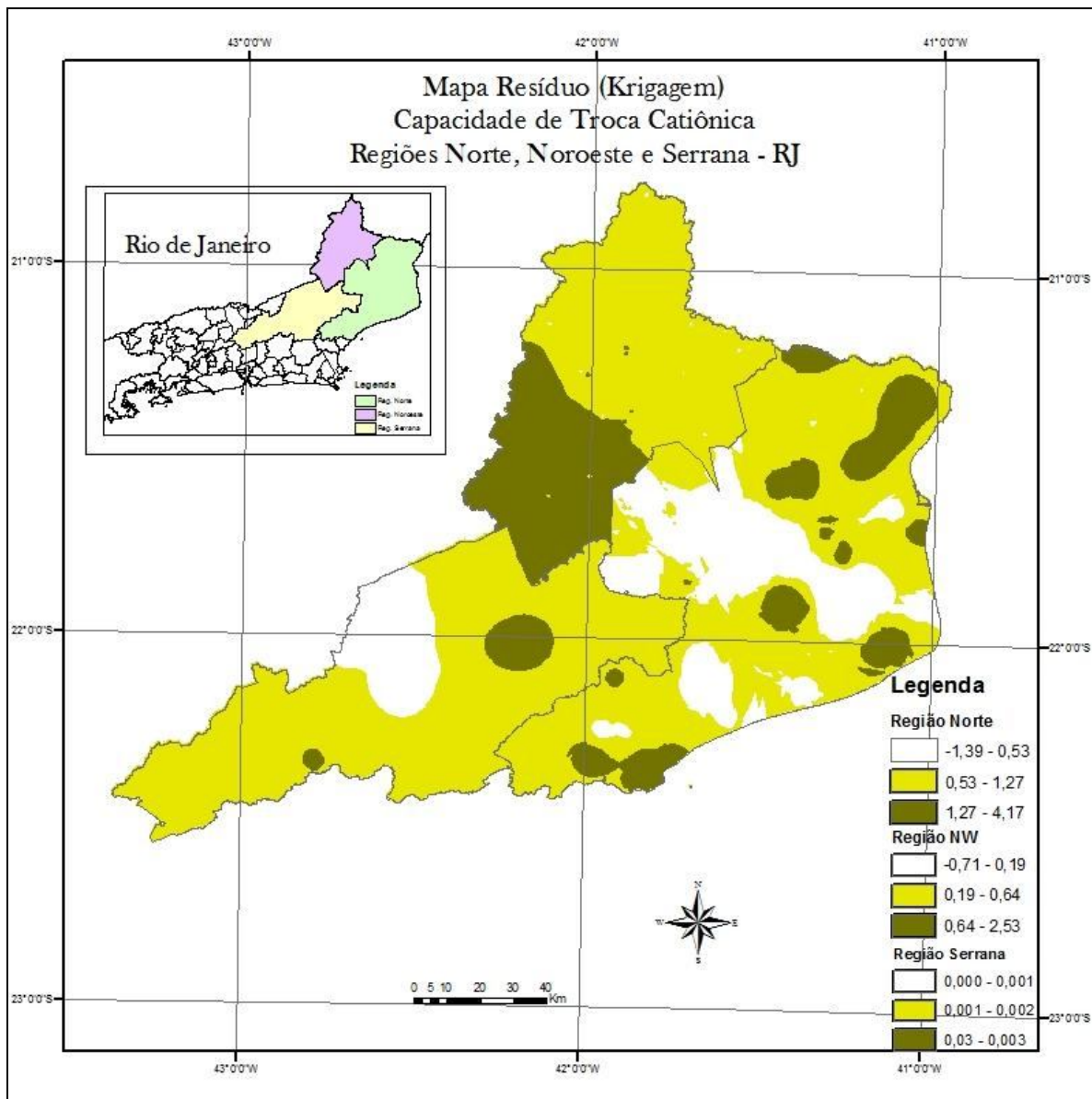


Figura 4.4.10: Resíduos (kigagem) resultado dos modelos de RLM da variável CTC.

Saturação por Base

A figura 4.4.11A ilustra o mapa final de V% ($\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$), (RLM + krigagem), os histogramas (Figura 4.5.11B) e o mapa de resíduos (Figura 4.4.12) da distribuição para a região Norte, Noroeste e Serrana. No mapa de resíduo (Figura 4.4.12), as áreas de maior incerteza, coincidem com os altos níveis de V% na região Norte. Na Faixa Litorânea (Figura 4.4.11A), os níveis de V% considerados altos, segundo dados deste trabalho, estão entre 44,8 e 87,5% (Figura 4.4.11B). Esses níveis estão concentrados na Baixada Campista e no município de São João da Barra, localizados na região Norte, esses altos valores ocupam 10,6% do total da região. Segundo Nascimento, et al (2004), em seus estudos sobre a região Norte Fluminense, observaram que as áreas da Baixada Campista apresentaram maiores valores de saturação por bases; estes resultados são semelhantes aos encontrados no presente estudo. Os níveis medianos de V% estão entre 30 e 45% e ocupam uma porção maior com 40% neste domínio e na região Norte 54%. Os níveis baixos de V% estão entre 5,6 e 30,3%, ocupando 20% do compartimento e 35,4% da região Norte (Figura 4.4.11B). Os níveis baixos, em geral, estão localizados em áreas que ocorrem os Argissolos (Lumbreras, et al. 2004) e Latossolos (Lumbreras, et al. 2004), os resultados corroboram a literatura. A maioria dos Latossolos, no Estado do Rio de Janeiro, apresenta solos com caráter distrófico, ou seja, com níveis inferiores a 50% para o valor V%. Os Argissolos são menos intemperizados do que os Latossolos, e quanto a fertilidade natural, são bastante variáveis; podem ser distróficos ($V < 50\%$) ou eutróficos ($V > 50\%$) (Almeida, 1988). Solos eutróficos são importantes para o bom desenvolvimento de culturas, por exemplo, para se obter uma produção adequada de cana-de-açúcar nas regiões que apresentaram níveis de V% entre baixo e médio. Seria preciso, segundo Rajj et al. (1996) elevar a saturação por base para 60%.

O domínio geoambiental Norte-Noroeste Fluminense (Figura 4.4.11A) apresenta altos valores de V% com 57% dos valores na região que compreende o Noroeste Fluminense. Esses valores estão entre 54,8 e 76,5% (Figura 4.4.11B). Os valores médios estão entre 41,9 e 54,8% e ocupam 24,6% da região Noroeste, incluindo o compartimento do Planalto do Alto Itabapua. Os valores considerados baixos estão entre 13,5 e 41,9%

(Figura 4.4.11B) e estão concentrados nos municípios de Cambuci, Miracema e Itaocara na região Noroeste e na região Norte nos municípios de Campos (região mais ao norte do município) e Cardoso Moreira; com cerca de 20% dos dados no domínio Norte-Noroeste Fluminense. A extensa região dominada por colinas, morrotes e morros baixos apresenta, em geral, Argissolos Vermelho-Amarelos e Vermelhos eutróficos, com moderada fertilidade natural (Dantas, et al. 2001). Os Argissolos Vermelho Amarelo eutróficos, em geral, apresentam valor V% igual ou superior a 50%. Esses solos ocorrem, predominantemente, em relevo ondulado a forte-ondulado, como nos municípios de Italva, Santo Antônio de Pádua, Itaocara, entre outros. A principal limitação deste solo é o risco de erosão, sobretudo, para culturas perenes como o café (Almeida, et al. 1988). O Planalto do Alto Itabapuaana, inserido na região Noroeste Fluminense, apresenta cerca de 80% no domínio níveis medianos de V% entre 42 e 55%. A ocorrência de Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, por vezes, associados a afloramentos de rocha (Lumbreras, et al. 2004), ocorrem em locais de relevo ondulado e fortemente ondulado e, em geral, são solos eutróficos (Almeida, et al. 1988).

O Planalto da região Serrana (Figura 4.4.11A) possui 40% dos dados com níveis altos de V% (entre 53 e 87%) e 54,5% na região Serrana (Figura 4.4.11B), segundo os dados deste trabalho. No mapa de resíduo (Figura 4.4.12), as áreas de maior incerteza da distribuição de V%, ocupam a maior parte na região Serrana. Observando a figura 4.4.11A nota-se que os níveis considerados médios de V% entre 36 e 53%, com cerca de 20% no domínio e 36,5% na região Serrana e os níveis considerados baixos de V% entre 15 e 36%, que ocupam 4% do domínio e 9% na região Serrana (Figura 4.4.11B). O domínio da Serra dos Órgãos possui a maior área com níveis médios, com cerca de 20%. Os valores altos ocupam cerca de 5% deste compartimento, estando concentrados no município de Santa Maria Madalena. Os valores considerados baixos possuem 6% do domínio. Estes níveis de V% são compatíveis com a literatura (Tomé Jr, 1997), que apresentam os níveis de V% da seguinte forma: baixo (entre 20 e 40%), médio (entre 40 e 60%) e alto (acima de 60%). Os Argissolos Vermelho-Amarelos, como um dos principais solos da região Serrana, têm saturação de bases bem variável. Os Latossolos Vermelho-Amarelos, outra importante classe de solo na região, possuem baixos valores de V% e, nos Cambissolos, V% pode

variar entre de 5 a 80% (Carvalho et al. 2000). Variações microclimáticas, com altitudes altas, influência no tipo e na composição de espécies de vegetação, taxas de intemperismo e lixiviação de intensidade, resulta no *feedback* sobre as propriedades do solo, tais como quantidade e qualidade da saturação por bases (V%) (Dahlgren et al. 1997).

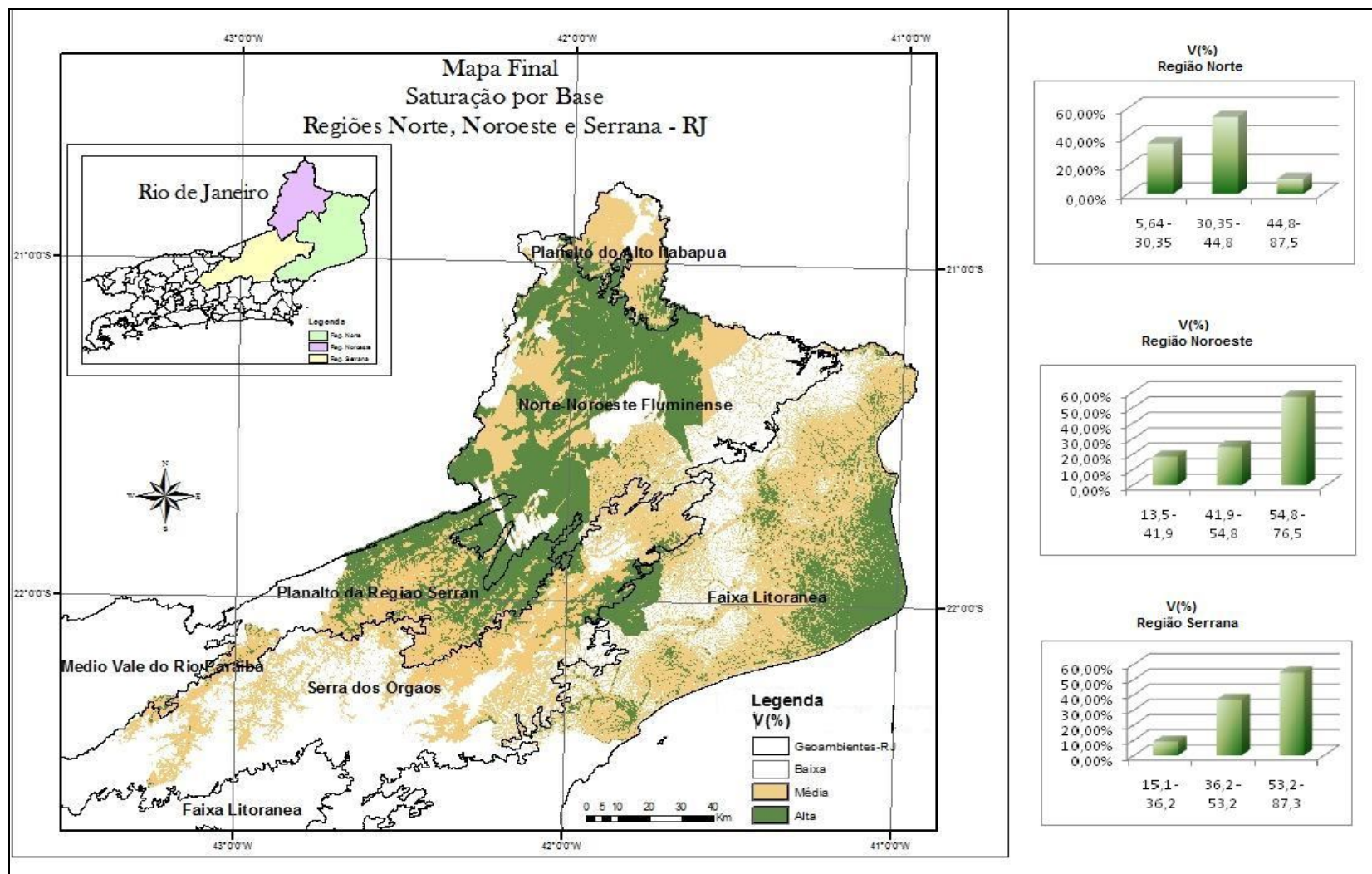


Figura 4.4.11: Mapa (Regressão + Krigagem) V% Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B). Geoambientes (CPRM-RJ, 2000).

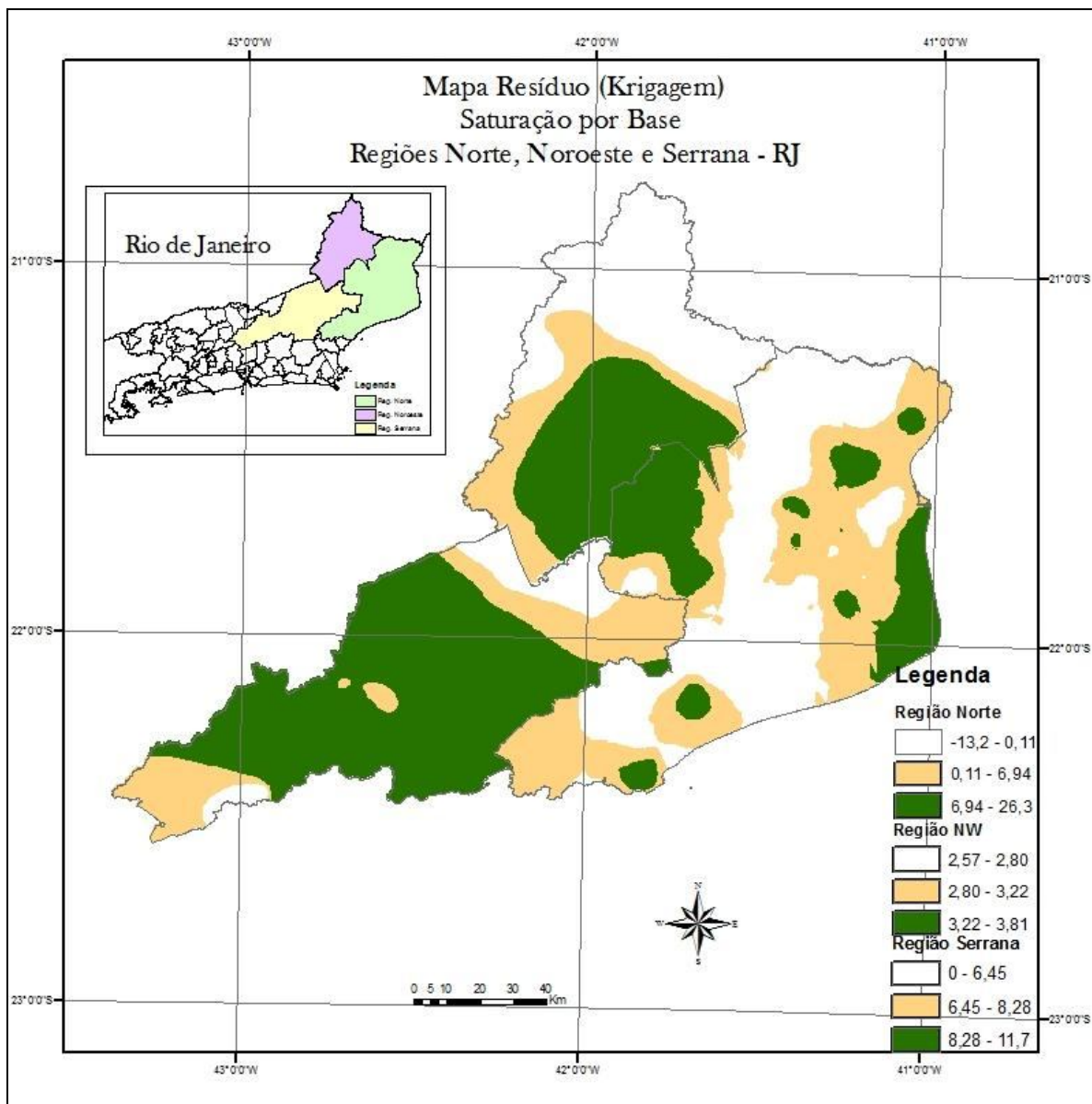


Figura 4.4.12: Resíduos (kigagem) resultado dos modelos de RLM da variável V%.

Saturação por Alumínio

A figura 4.4.13A ilustra o mapa final de Al(m)% (RLM + krigagem), os histogramas (Figura 4.4.13B) e o mapa de resíduos (Figura 4.4.14) da distribuição para a região Norte, Noroeste e Serrana. No mapa de resíduo (Figura 4.4.14), as áreas de maior incerteza, ocupam a maior parte da região Norte e Noroeste. Observando a figura 4.4.13A nota-se que a Faixa Litorânea possui valores considerados baixos de Al(m)% (Figura 4.4.13A), segundo os dados deste trabalho, níveis entre 0,01 e 27,5%. Esses valores estão distribuídos na parte mais ao norte e a oeste deste domínio. Em relação à região Norte, estes valores ocupam 56,8% da região. Os valores médios de Al(m)%, que estão entre 27,5 e 38%, estão localizados na Baixada Campista, no entorno da Lagoa Feia, no município de São João da Barra, nas mediações do rio Paraíba do Sul e na parte mais ao sul do município de São Francisco de Itabapua. Esses níveis de Al(m)% médios ocupam 39% da região Norte e, na mesma proporção, no domínio da Faixa Litorânea. Os valores considerados altos de Al(m)% que estão entre 38 e 58% estão concentrados no entorno na Lagoa Feia, em Campos, esses níveis ocupam 4,16% da região (Figura 4.4.13B). A elevada saturação por Al em subsuperfície é uma das causas da redução do rendimento das culturas (Gonzalez-Erico et al,1979). Pode-se verificar, que nas áreas que possuem maiores valores de Al(m)%, aparece também, maior acidez do solo (Figura 4.4.1A). Níveis de pH menores que 5,5, a dissolução das formas sólidas de Al tende a aumentar, ocorrendo a liberação de formas iônicas à solução do solo. Um dos grandes problemas do Al para a planta é a redução do crescimento radicular e prejuízos na absorção dos nutrientes do solo (Fernandes, 2006). Segundo Almeida, et al. (1988) a cana-de-açúcar, cultivo importante nesta região, é, em geral, relativamente tolerante ao alumínio tóxico.

O domínio geoambiental Norte-Noroeste Fluminense e o Planalto do Alto Itabapua (Figura 4.4.13A) são semelhantes na variabilidade do Al(m)%. A espacialização desta variável é importante, pelo fato que a região possui produtividades consideráveis de tomate, abacaxi, cana-de-açúcar, entre outras culturas (CIDE, 2005). Verifica-se que 70% deste compartimento possui valores, considerados médios de Al(m)%, segundo dados deste trabalho, os níveis estão entre 1,3 e 3,1%. Os níveis de Al(m)%,

considerados altos entre 3,1 e 11,7%, ocupam menos de 3% dos dois compartimentos. Na região Noroeste os valores, considerados altos, ocupam 2% da região. Os níveis considerados baixos de Al(m)%, entre 0,07 e 1,3%, ocupam 20% dos dois compartimentos (Figura 4.4.13B). Estes níveis de Al(m)%, segundo Tomé Jr. (1997), não são considerados prejudiciais para a maioria das plantas, por se encontrar abaixo de 15% de Al(m)%. Argissolos Vermelho-Amarelos e Vermelhos eutróficos (Lumbreras, et al. 2004) que ocorrem na região, em geral, apresentam baixa saturação por alumínio, principalmente nos Argissolos Vermelho eutrófico (Almeida, et al 1988).

O Planalto da Região Serrana e a Serra dos Órgãos apresentam, basicamente, níveis de Al(m)% entre baixo e médio, segundo os dados deste trabalho (Figura 4.4.13A). Os valores considerados médios de Al(m)% compreendem 20% nos dois domínios e estão entre 36 e 59%. Os níveis de Al(m)%, considerados baixos, estão entre 18 e 36% e ocupam a maior parte do compartimento com 80%. Níveis acima de 15% de Al(m)% já são considerados prejudiciais a maioria das culturas (Tomé Jr., 1997). Os níveis considerados altos de Al(m)%, entre 58 e 100%, ocupam menos de 10% nos dois compartimentos. Em a região Serrana, inserida nos dois domínios, os níveis baixos ocupam 79% da região, os níveis medianos ocupam 17,04% e os níveis considerados altos ocupam 4% da região (Figura 4.4.13B). Segundo a literatura, os valores acima de 15% e abaixo de 30% Al(m)% são níveis médios, mas que já seriam prejudiciais a maioria das culturas. O ideal seria níveis abaixo de 15% de Al(m)% (Tomé Jr., 1997). Estes dois domínios geoambientais, segundo os níveis determinados na literatura, possuem, na totalidade, valores acima dos níveis considerados adequados para as plantas. Nos solos da região Serrana, por exemplo, os Latossolos Vermelho-Amarelos, a saturação de alumínio é alta, com valores acima de 50% e nos Cambissolos o grau de saturação por alumínio pode variar de 0 a 75% (Carvalho et al. 2000). A saturação de alumínio provoca deficiência da maioria dos micronutrientes, a baixa disponibilidade de N, P e K e ocorrem com alta frequência nos solos ácidos (Oliveira, et al 2005).

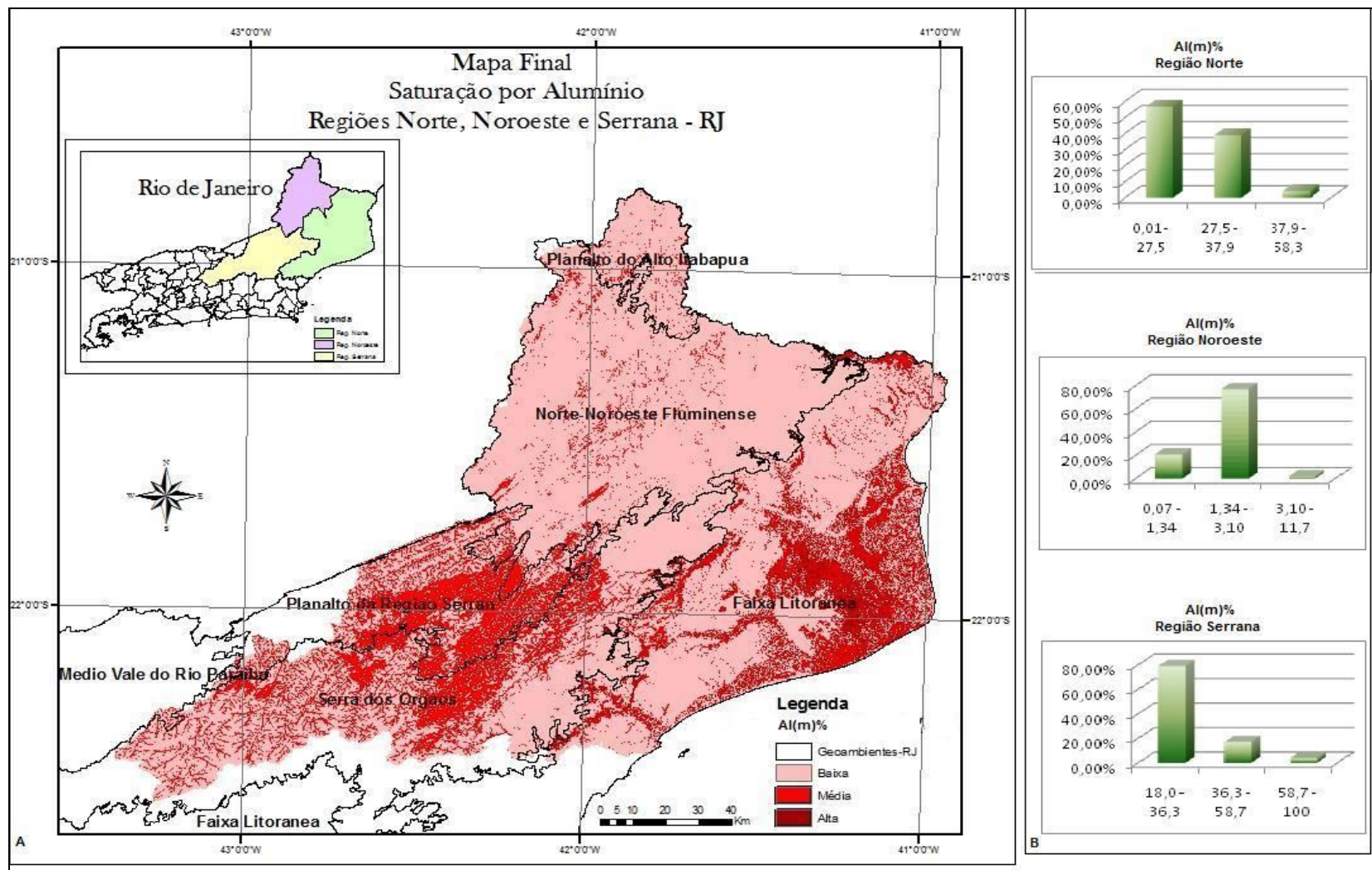


Figura 4.4.13: Mapa (Regressão + Krigagem) Al(m)% Regiões Norte, Noroeste e Serrana (A) e Histogramas das Regiões Norte, Noroeste e Serrana (B). Geoambientes (CPRM-RJ, 2000).

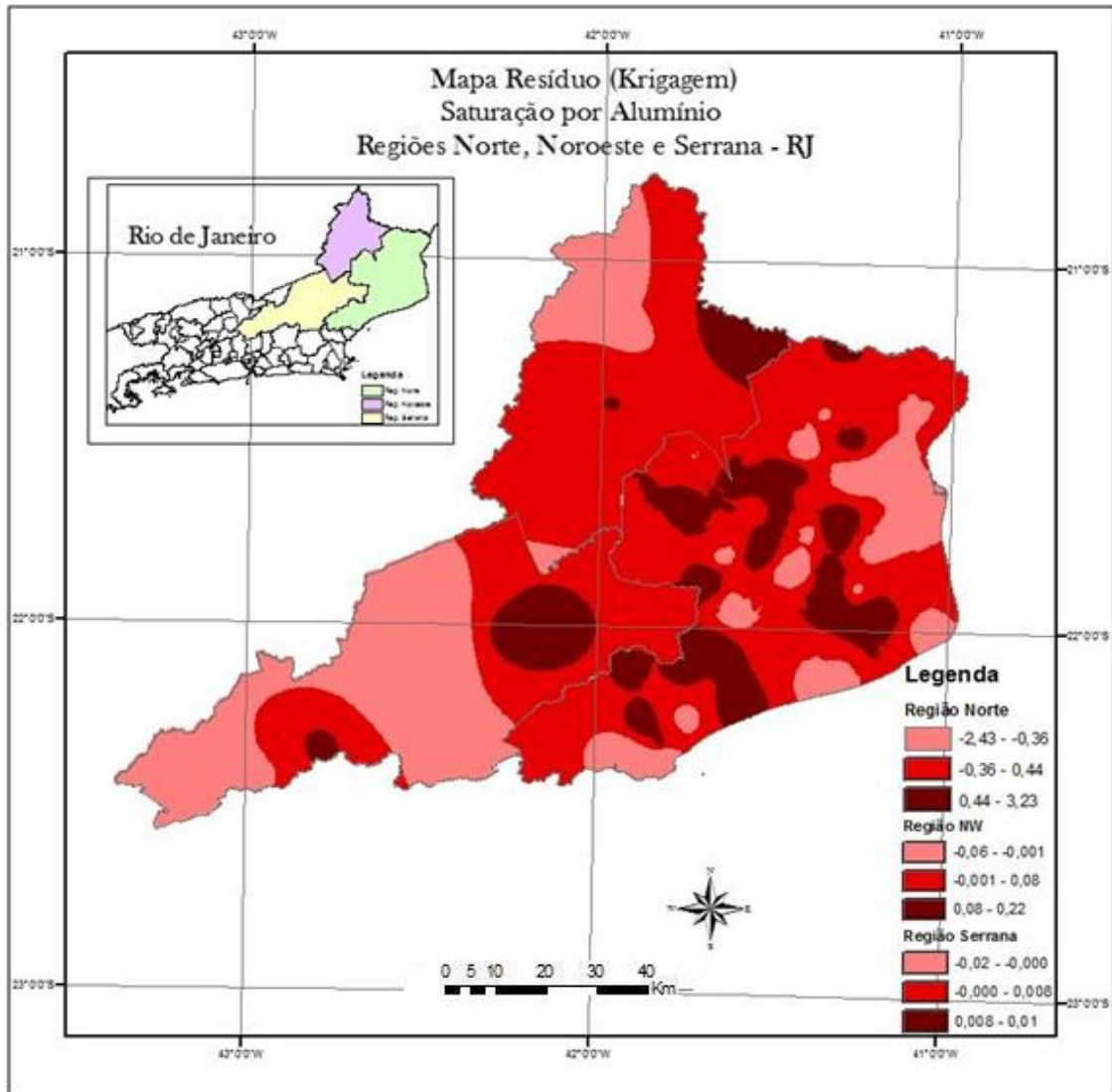


Figura 4.4.14: Resíduos (kigagem) resultado dos modelos de RLM da variável Al(m)%.

Não foi possível a realização de uma síntese de mapas, devido as características dos solos das três regiões, onde estes solos são caracterizados como solos ácidos e de baixa fertilidade. O fósforo foi um dos grandes impasses para que se pudesse realizar a álgebra de mapas nas três regiões estudadas, por possui níveis muito baixos de fósforo nas regiões. A saturação por alumínio, por exemplo, também apresentou limitações na região Serrana onde níveis abaixo de 15% (considerados bons para a fertilidade do solo) não estão presentes no conjunto de dados desta região. A região Serrana também apresentou somente níveis de pH entre baixo e médio. Na região Noroeste os valores da saturação por alumínio, considerados, altos ocupam apenas 2% da região. Carbono na região Serrana menos de 10%. Para a realização da síntese da fertilidade do solo as variáveis deveriam ocorrerem simultaneamente, não foi possível a realização da síntese de fertilidade, pois algumas das variáveis não ocorrem simultaneamente.

5_Conclusões

Neste trabalho, a retirada de valores extremos reduz os níveis de atributos de fertilidade. As variáveis: fósforo, potássio e carbono, foram as que apresentaram maiores valores extremos, por esses elementos estar presentes na maioria dos fertilizantes. A região Norte, por exemplo, foi a região que mais apresentou problemas com valores extremos, possivelmente a incorporação de fertilizantes devido ao cultivo de cana-de-açúcar na região. Após a retirada dos valores extremos, as três variáveis fósforo, potássio e carbono, principalmente as duas primeiras, apresentaram valores ainda mais baixos, quase que na totalidade das três regiões. Mesmo com a retirada de valores extremos de carbono, esta ainda apresentou valores considerados altos para a fertilidade natural do solo, principalmente nas regiões Norte e Noroeste. As variáveis pH e saturação por base têm distribuição aproximadamente simétrica em todas as regiões, exibindo uma característica natural dos solos.

Na análise dos dados ambientais, também foi necessário a retirada de alguns valores extremos, o que fez que ocorresse melhoras nas correlações entre as variáveis químicas de fertilidade com as variáveis ambientais, aumentando, por exemplo, o R^2 . Houve, também, uma melhora nos demais parâmetros analisados, como RMSE e o AIC, onde estes diminuíram. O C_p de Mallow's também ficou mais próximo do número de variáveis envolvidas no modelo e a probabilidade de F ser diferente de zero diminuiu.

Os resultados de predição das propriedades de fertilidade do solo indicam que a fertilidade do solo destas três regiões, consideradas uma das mais produtivas do Estado do Rio de Janeiro em muitas áreas, apresenta acidez bastante considerável. Isto representa uma limitação à produção agrícola, como por exemplo, em Campos dos Goytacazes, na região Norte, mas precisamente no domínio geoambiental que compreende a Faixa Litorânea, onde a correção dessa acidez é de grande relevância devido ao cultivo de cana-de-açúcar, entre outras culturas. Outro fator importante é a baixa fertilidade do solo, principalmente de nutrientes como o fósforo nos domínios geoambientais, podendo assim, limitar o desenvolvimento das culturas. O Fósforo na região Noroeste foi a única a apresentar uma faixa de fertilidade indo de baixa até o nível considerado médio. Onde

variáveis como o carbono, a saturação por base e a capacidade de troca catiônica indicaram, em algumas áreas, estar dentro da faixa ótima para fertilidade nas três regiões. O domínio geoambiental Norte-Noroeste Fluminense apresentou o maior nível de saturação por base, apresentando níveis entre 55 e 76%. Ainda no domínio Norte-Noroeste e no Planalto do Itabapuana, apresentaram níveis acima de 8,6 (cmol_c.kg⁻¹) de capacidade de troca catiônica (níveis considerados bons para a literatura). Apenas cerca de 5% no compartimento Norte-Noroeste apresentou níveis abaixo de 10 (cmol_c.kg⁻¹) de capacidade de troca catiônica. Este mesmo compartimento, juntamente com o Planalto do Itabapuana e a Faixa Litorânea, apresentou níveis adequados de carbono. Os geoambientes Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos apresentaram níveis inferiores em relação aos demais domínios, onde mais de 80% dos dados estão abaixo de 23(g/kg) de carbono.

O mapeamento digital, com o uso da metodologia regressão krigagem (regressão + krigagem dos resíduos) e com o uso de dados auxiliares, obteve bons resultados de predição. Os resultados obtidos neste trabalho indicam a importância da informação secundária disponível, que é usada para modelar a variação de um atributo do solo. Utilizando os métodos híbridos, tais como regressão com krigagem dos resíduos, pode se obter bons resultados. Os resultados alcançados mostram que a utilização de atributos do terreno, dados de solos, NDVI e dos índices espectrais em uma abordagem por regressão krigagem podem contribuir para melhoria da qualidade das predições de propriedades de solos. A disponibilidade de dados de sensores remotos orbitais a custos mais baixos e a facilidade de obtenção dos atributos do terreno em um sistema de informação geográfico tornam a abordagem utilizada eficiente e promissora. Neste trabalho, as variáveis ambientais que mais contribuíram para o mapeamento foram às variáveis de terreno e solo. Também é óbvio que para as variáveis ambientais, como solo que, em geral, possui forte dependência das propriedades da paisagem como uso da terra e de gestão, estas variáveis ambientais foram importantes para explicar melhor as propriedades químicas do solo.

A álgebra de mapas foi um processo que não pode ser utilizado para obter uma síntese da fertilidade do solo nas três regiões. Este procedimento de espacializar atributos importantes para a estimativa da aptidão agrícola das terras e a definição de intervalos numéricos para as diferentes classes, em alguns casos não foi possível ter essas classes para a fertilidade do solo. Um dos grandes motivos foi a ausência, quase que por completa de

níveis adequados do fósforo, da saturação por alumínio, de carbono e capacidade de troca catiônica. Os níveis considerados altos de potássio, apenas 0,04% na região Norte. Se comparados com os níveis da literatura, não existiriam níveis baixos nem médios. Os níveis acima de potássio 0,23 (cmol_c/kg) são considerados bons para a fertilidade, onde as faixas dos dados, na região Norte, estão entre 0,30 e 1,04 (cmol_c/kg).

Com base em informações pré-existentes sobre as concentrações de nutrientes na camada arável do solo, e na sua reconhecida capacidade de gestão e apresentação de informação, o mapeamento digital de solos pôde permitir elaborar mapas indicativos de nutrientes do solo, para que possa ser realizado um planejamento adequado e eficaz na aplicação de fertilizantes.

Para perspectivas futuras, este trabalho pode servir de base para futuros estudos mais detalhados. Como direcionar novas amostragens para a fertilidade natural e antrópica. Aplicação de outras metodologias no intuito de testar e comparar com a metodologia do presente trabalho.

Dentro desta perspectiva, a agricultura fluminense deve ser considerada de forma mais centrada, introduzindo tecnologias apropriadas de fertilização e calagem, direcionando-se para uma maior especificidade de culturas e para a produção de alimentos naturais.

6_ Referência Bibliográfica

ALMEIDA, D.L. SANTOS, G.A.; DE-POLII, H.; CUNHA, L.H.; FREIRE, L.R.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; PEREIRA, N.N.C.; EIRA, P.A.; BLOISE, R. e SALEK, R.C. 1988. Manual de adubação para o Estado do Rio de Janeiro. Ed. Universidade Rural. n.2. Itaguaí, RJ, 179p.

ALLISON, E.H., W.N. ADGER, M.C. BADJECK, K. BROWN, D. CONWAY, N.K. DULVY, A. HALLS, A. PERRY AND J.D. REYNOLDS. 2005. Effects of climate change on the sustainability of capture and enhancement fisheries important to the poor: analysis of the vulnerability and adaptability of fisherfolk living in poverty. Project No R4778J, Fisheries Management Science Programme, MRAG for Department for International Development, London, 167 pp. Disponível: <http://www.fmsp.org.uk/Documents/r4778j/R4778J_FTR1.pdf>. Acessado: 31/08/09.

ALVAREZ VFC; DUETE RRC; MURAOKA T; DUETE WLC; ABREU JÚNIOR CH. 2002. Utilização de fósforo do solo e do fertilizante por tomateiro. *Scientia Agricola* 59: 167-172.

ANDREWS, F.M., MORGAN, J.N., SONQUIST, J.A., AND KLEM, L., 1973. Multiple Classification Analysis, 2nd ed., Institute for Social Research, The University of Michigan, Ann Arbor.

ANTONELLO, LOIVA LIZIA; WITTERN, KLAUS PETER; CLAESSEN, MARIE ELISABETH CHRISTINE; BERTOLINO, LUIZ CARLOS. V. 2002. Mineralogia e química de algumas unidades de solos do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro Embrapa Solos. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 15. 21p.

AHMED, S., DE MARSILY, G., 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity T and specific capacity. *Water Resources Research* 23 (9): 1717–8 1737.

AKAIKE, H. 1983. Information measures and model selection. *International Statistical Institute*, v.44, p.277-291.

ALVA, A.K.; OBREZA, T.A. 1994. Reactions of copper and sulfate in sand soils under citrus grove and uncultivated conditions. *Soil Science*, Baltimore, v.158, n.1, p.56-64, July 1994.

ARNON, D.I.; STOUT, P. R. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, v. 14, n. 2, p. 371-375.

ATKINSON, A. C. (1981). Likelihood ratios, posterior odds and information criteria. *Journal of Econometrics*, **16**, p.15-20.

AZEVEDO, H.J. 2002. Uma Análise da Cadeia Produtiva de Cana-de- Açúcar na Região Norte Fluminense. Observatório Sócio Econômico da região Norte Fluminense. Boletim Técnico 06. 51p.

BARTHOLD, F. K., SAYAMA, T., SCHNEIDER, K., BREUER, L., VACHÉ, K. B., FREDE, H.-G., AND MCDONNELL, J. J.: 2008. Gauging the ungauged basin: a top-down approach in a large semiarid watershed. *Adv. Geosci.*, 18, 3–8p.

BARROSO, J. A.; BARROSO, E. V.; RAMALHO, R. S.; FERREIRA, S. A. 2003. Algumas considerações sobre o Potencial Geológico de Campos dos Goytacazes-RJ para a Produção de Pedras Ornamentais. *Solos e Rochas*, 26 (3)275-286.

BAXTER, S. J.; OLIVER, M. A. 2005. The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation, *Geoderma* 128: 325-339p.

BELL, J.C., CUNNINGHAM, R.L., HAVENS, M.W., 1992. Calibration and validation of a soil –landscape model for predicting soil drainage class. *Soil Science Society of America Journal* 56, 1860–1866.

BELL, J.C., CUNNINGHAM, R.L., HAVENS, M.W., 1994. Soil drainage probability mapping using a soil – landscape model. *Soil Science Society of America Journal* 58, 464–470p.

BERK, R. A. 2004. *Regression Analysis: A Constructive Critique*, Sage Publications.

BERNDES, G. AND P. BÖRJESSON. 2002: Multi-functional biomass production systems. Disponível: <<http://www.brdisolutions.com/pdfs/bcota/abstracts/6/70.pdf>>. Acesso: 17/09/2009.

BERNDES, G., F. FREDRIKSON, AND P. BORJESSON. 2004: Cadmium accumulation and Salix-based phytoextraction on arable land in Sweden. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103, 207-223.

BISO, T. MCBRATNEY, A.B. 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field maps of the extent of soil property. *Geoderma*. V.103. p. 149-160.

BOYER, J. 1985. Dinâmica dos elementos químicos e fertilidade dos solos. Ed.: Ilson G. Carvalho. Instituto de Geociências- UFBA- Departamento de Geoquímica, 328p.

BRADY, N.C.; WEIL, R. 1999. *The Nature and Properties of Soils*. 11th edition. Macmillan Publsh. Company.

BROWN, D.J., SHEPHERD, K.D., WALSH, M.G., MAYS, M.D., REINSCH, T.G., 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 132, p 273 -290.

BUI, E.; SIMON, D.; SCHOKNECHT, N.; PAYNE, A., 2007. Chapter 15. Adequate prior sampling is everything: lessons from the Ord River basin, Australia. In: P. Lagacherie, A.B. McBratney and M. Voltz (Eds.), Digital Soil Mapping, an introductory perspective. Developments in soil science, vol. 31. Elsevier, Amsterdam, pp. 193–206.

BURGESS, T.M. WEBSTER, R. 1984. Optimal sampling strategies for mapping soil types: II. Risk functions and sampling intervals. J. Soil Sci. 35, 655-655pp.

BURROUGHS, P. A; BOUMAB, J.; YATES, S. R. 1994. The state of the art in pedometrics. Geoderma. Amsterdam, v.120, p.79-74

BURROUGHS, P. A.; Mc DONNELL, R. Principles of Geographical Information Systems. Spatial information systems and geostatistics. New York: Oxford University Press, 333p. 1998.

BURROUGHS, P. A., VAN GAANS, P. F. M., HOOTSMANS, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. Geoderma, v. 77, p. 115-135, 1997.

BUSSAB, W.O e MORETTIN, P.A 2002. Estatística Básica. 5 ed. São Paulo: Saraiva. 526p.

CAMBARDELLA, C.A. et al.1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. Soil Science Society American Journal, Madison, v.58, n.8. 1501-1511pp.

CATEN, A. 2008. Aplicação de componentes principais e regressões logísticas múltiplas em sistema de informação geográficas para predição e mapeamento digital de solos. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria- Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo. 128p.

CARVALHO, et al. 2000. Recuperação de áreas degradadas através da introdução de gramíneas forrageiras e de leguminosas arbóreas no estado do Rio de Janeiro. Embrapa. 52p.

CARVALHO FILHO, A. DE; LUMBRERAS, J. F.; WITTERN, K. P.; LEMOS, A. L.; SANTOS, R. D. DOS. 2003. Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos (Rio de Janeiro, RJ), 2003. Contem texto e mapa color., escala 1:250.000. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 32).

CARVALHO, L. A.; LIBARDI, P. L.; CRUZ, A. C. R.; ROCHA, G. C. 2007. Caracterização hidráulica de um latossolo vermelho associada a caracterização pedológica do perfil. Ciência Rural, v. 37, n.4, p. 1008-1013.

CARVALHO FILHO, A. DE; LUMBRERAS, J. F.; WITTERN, K. P.; LEMOS, A. L.; SANTOS, R. D. DOS; CALDERANO FILHO, B.; CALDERANO, S. B.; OLIVEIRA, R.

P.; AGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S. DE; CHAFFIN, C. E. Mapa de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003b. 1 mapa, color. Escala 1:250.000. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/sigweb.html>. Acesso em: 14 abr. de 2005.

CHAGAS, C. da S. Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros. Viçosa, 2006. 223f. (Doutorado em solos e nutrição de plantas) – UFV.

CHAMBERS, J. and HASTIE, T. 1992. *Statistical Models in Soil*. Wadsworth & Books, Pacific Grove, California.

CHAPLOT, V., M. BERNOUX, C. WALTER, P. CURMI, AND U. HERPIN. 2001. Soil carbon storage prediction in temperate hydromorphic soils using a morphologic index and digital elevation model. *Soil Sci.* 166:48–60.

CHAVES, L. H.G. et al. M. 2004. Propriedades químicas do solo aluvial da Ilha de Assunção – Cabrobó. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 28, p. 431-437

CHRISTENSEN, R., 2001. *Linear Models for Multivariate, Time Series, 49 and Spatial Data*, 2nd Edition. Springer Verlag, New York, p. 393.

CIDE-Fundação Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro. 2005: Endereço: <www.cide.rj.gov.br>. Acesso: 12/09/2005.

CIDE-Fundação Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro. 2008: Anuário Estatístico do Estado do Rio de Janeiro 2008. Endereço: <www.cide.rj.gov.br>. Acesso: 24/02/2009.

COELHO, F. S. *Fertilidade de Solo*. Campinas, 1973. 384 p.

COOK, D.; WEISBERG, S. 1982. Criticism and Influence Analysis in Regression, *Sociological Methodology*, Vol. 13. (1982), pp. 313-361

COOK, R.D. AND S. WEISBERG. 1999. *Applied Regression Including Computing and Graphics*. Probability and Statistics. John Wiley and Sons, New York. 583p.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2001. Geologia, geomorfologia, geoquímica, geofísica, recursos minerais, economia mineral, hidrogeologia, estudos de chuvas intensas, aptidão agrícola, uso e cobertura do solo, inventário de escorregamentos, diagnóstico geoambiental. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM/E. Rio de Janeiro

CRUZ, A.C.R.; PAULETTO, E.A.; FLORES, C.A. & SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 27:1105-1112, 2003.

DAHLGREN, R.A., J.L. BOETTINGER, G.L. HUNTINGTON, AND R.G. AMUNDSON. 1997. Soil development along an elevational transect in the western Sierra-Nevada, California. Geoderma 78:207–236.

DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. Aust. J. Soil Res., 24:281-292, 1986.

DANTAS, M.E.; SHINZATO,E.; MEDINA,A.I.M.; SILVA,C.R.; PIMENTEL,J.; LUMBRERAS,J.F.; CALDERANO,S.B. & CARVALHO FILHO,A. (2001). *Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro*, Brasília/CPRM. Mapa. CD-ROM. 35p.

DEMATTE, J.L.I.; MAZZA, J. A.; DEMATTE, J. A. M. 1996. Caracterização e gênese de uma topossequência Latossolo Amarelo-Podzol originado de material da formação Barreiras, Estado de Alagoas. Scientia Agricola, v. 53, n. 1, p. 20-30.

DEMATTE,J.L.I.; MAZZA,J.A.; DEMATTE,J.A.M. 2004. Caracterização e gênese de uma topossequência de latossolo amarelo-podzol originado de material de Formação Barreiras – Estado de Alagoas. Scientia agrícola, Piracicaba, v. 53, n.1, jan/abr. 20-30pp.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR., P. J. Model-Based geostatistics. New York: Springer, 228 p., 2007.

DORAN, J.W. 2002. Soil health and global sustainability: Translating science into practice. Agriculture, Ecosystems, and Environment 88 (2): 119-127.

ELDEIRY, A.A., GARCIA, L.A., 2008. Detecting soil salinity in alfalfa fields using spatial modeling and remote sensing. Soil Sci. Soc. Am. J. 72, 201–211.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1979. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10, 1979, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 83p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1981. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, RJ. Mapa de Solos do Brasil. 1: 5.000.000.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1983. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: Reunião de Classificação, Correlação de Solos e Interpretação da Aptidão Agrícola, 2. **Anais...** Rio de Janeiro. 1983. 138p. (Série Documento, 5).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1994. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Goiaba para exportação: aspectos técnicos da produção. Brasília: EMBRAPA-SPI, 49 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1999. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2007. Agência de Informação. Solos. Endereço:

<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia4/AG01/arvore/AG01_2_2072004152820.html>. Acesso: 27/05/2008.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2008. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. São Paulo. Disponível:<
<http://www.climaeagricultura.org.br/download.html>>. Acesso:10/07/2009.

ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L. 2000. Influencia da combinação de fósforo e calcário no rendimento do milho. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, n.24, p.537-544

FAGERIA, N.KUMAR. Solos Tropicais e Aspectos Fisiológicos das Culturas. EMBRAPA-DRU, Brasília, 1989. 409 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2003. Assessment of soil nutrient balance. Approaches and methodologies. Rome. pp. 101.

FAO. Food and Agriculture Organization. 2008. Feeding the World Sustainable Management of Natural Resources. April. 19p. Disponível: <<http://www.fao.org/corp/>> Acessado: 20/05/2009.

FAO. 2009a. Hunger Map. Endereço: <http://www.fao.org/economic/ess/food-security-statistics/fao-hunger-map/en/>>. Acessado: 12/06/2009.

FAO_Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2009b. FAO and traditional knowledge: the linkages with Ustainability, food security and climate change Impacts.16p.Endereço: <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0841e/i0841e00.pdf>>
Acessado: 08/07/2009.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004. Fertilizer use by crop in Brazil. Rome, Endereço: <<http://www.fao.org/ag/agl/agll/oldocsp.jsp>>. Acesso: 20/10/2009.

FARDEAU, J.C. 1996. Dynamics of phosphate in soils: an isotopic outlook. Fertility Research, v.45, p.91-100.

- FAUSTO, B. 1995. História do Brasil. EDUSP, 653 p.
- FERNANDES, Manlio Silvestre. 2006. Nutrição Mineral de Plantas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Viçosa, MG. 2006. 432 p.
- FERRARI, A. L.; MELO, E. F.; VAZ, M. A. A.; DALCOMO, M. T.; BRENNER, T. L.; SILVA, V. P.; NASSAR, W. M. 1981. PROJETO CARTA GEOLÓGICA DO RIO DE JANEIRO – Bloco Campos – *In*: Relatórios Técnicos, volume I – DRM – Geomitec, Geologia e Mineração Trabalhos Técnicos Ltda. 172p.
- FINKE, et al. 2004. Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. *Geoderma*. v123 i1-2. 23-39.
- FONSECA, MARIA FERNANDA; CAMPOS, FÁBIO F. de. 1999. O estudo do mercado dos orgânicos no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: PESAGRO-RIO/EENF- FINEP/FAPERJ. 150p.
- FONSECA, M. J. G.; PEÇANHA, R. M.; JUNHO, M. C. B.; FRANCISCO, B. H. R.; DREHER, A. M.; SERRÃO, M. A. 1998. Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. 141p.
- FOTH, H.D. Fundamentals of Soil Science. 8th ed. John Wiley & Sons, New York.
- FRANZMEIER, D.P., PEDERSON, E.J., LONGWELL, T.J., BYRNE, J.G. & LOSCHE, C.K. 1969. Properties of some soils in the Cumberland Plateau as related to slope aspect and topography. *Soil Sci. Soc. Am. Pro.* 33:755-761.
- FREEDMAN, D.A. 2005. *Statistical Models: Theory and Practice*, Cambridge University Press.
- FRIZZO, S.J., LICHT, O.A.B. Estatística uni e bivariadas aplicadas à prospecção geoquímica. *In*: LICHT, O.A.B., DE-MELLO, C.S.B., DA-SILVA, C.R. (eds). Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica (SBGq) e Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2007. 788p.
- FROGBROOK, Z. L.; OLIVER, M. A.; SALAHI, M.; ELLIS, R. H. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. *Soil Use and Management, Avenue*, v. 18, n. 1, p. 1-9, 2002.
- GEO Brasil 2002. *Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil. O estado dos solos/* Organizado por Thereza Christina Carvalho Santos e João Batista Drummond Câmara. - Brasília: Edições IBAMA, p.48-67.
- GOTWAY, C. A., STROUP, W. W., 1997. A Generalized Linear Model approach to spatial data analysis and prediction. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 2 (2): 157– 60 198.

GOMES, I.A. Oxisols and Inceptisols from gneiss in a subtropical area of Espírito Santo State. Brazil. Lafayette, Purdue University, 1976. 115p.(Tese de Mestrado).

GONZALEZ-ERICO, E.; et al. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of Central Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 43, p. 1155-1158, 1979.

GRUNWALD, S. (Ed.), 2006. *Environmental Soil-Landscape Modeling — Geographic Information Technologies and Pedometrics*. CRC Press, New York.

GRUNWALD, S., 2008. Reconstruction and scientific visualization of earthscapes considering trends and spatial dependence structures. *New J. Phys.* 10 (No. 125011) 15 pp.

GRUNWALD, S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma* 152, 195–207p.

GRUNWALD, S., REDDY, K.R., 2008. Spatial behavior of phosphorus and nitrogen in a subtropical wetland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1174–1183.

GUERRA, A.J.T. 2005. Processos erosivos nas encostas. In: Guerra, A.J.T. & Cunha, S.B. (Orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, p. 149-209.

GUERRA, A.J.T., OLIVEIRA, A., OLIVEIRA, F. & GONÇALVES, L.F.G. 2007. Mass Movements in Petrópolis, Brazil. *Geography Review*, 20(4): 34-37.

GUIMARÃES, E. C. 2004. *Geoestatística básica aplicada*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Matemática, Núcleo de estudos estatísticos e Biométricos, 77p.

HAYNES, R.J. 1984. Lime and phosphate in the soil-plant system. *Advances in Agronomy*, New York, v.37, p. 249-315.

HALL, G. F. Pedology and geomorphology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E. & HALL, G. F. (Eds.). *Pedogenesis and soil taxonomy. II. The soil orders*. Developments in soil science. New York: Elsevier, v.11b, p.118-140, 1983.

HAMADA, E.; ASSAD, M.L.L.; PEREIRA, D.A.; BOSCHI, R.S. 2007. Operações de álgebra de mapas em sistema de informação geográfica para estimativa da aptidão das terras. *Anais XII – Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 21-26, Florianópolis. INPE. 2713-2720p.

HAUCK, F.W. & DICKINSON, J. Conveniência y experimentacion con potasio en el cultivo de caña de azucar. *ATAC – R. Técnica Inf.*, 13:626-635, 1954.

- HENGL, T. 2003. Pedometrics mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches. Wageningen University, Enschede, 236p.
- HENGL, T. 2007. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. European Commission . Institute for Environment and Sustainability. Endereço:< <http://ies.jrc.ec.europa.eu>> Acesso: 18/01/2010.
- HENGL,T.; HEUVELINK, G. B.M.; Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120: 75–93p.
- HENGL, T., HEUVELINK, G.B.M. AND ROSSITER, D.G., 2006. About regression-kriging: from theory to interpretation of results. *Computers and Geosciences*, in review.
- HERBST, M.; DIEKKRÜGER, B.; VEREECKEN, H. Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. *Geoderma* v.132, p.206-221, 2006.
- HERRICK, J.E. & WANDER, M.M. 1998. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition, and soil biological activity. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F. & STEWART,B.A., eds. *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.405-425.
- <http://www.globalsoilmap.net/>. A New Digital Soil Map of the World. *Pedometron*, march, 2009. Acessado em 10/04/2009.
- HUIJBREGTS, C.J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J.C. & McCullagh, M.J. (ed) *Display and analysis of spatial data*. New York, John Wiley. p.38-53. 1975.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007. *Manuais Técnicos em Geociências*. n°4. Manual Técnico de Pedologia. 2ª Ed. Rio de Janeiro. 316p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2009. *Indicadores IBGE. Estatística da Produção Agrícola de 2009*. 50p.
- IRVIN, B. J.; VENTURA, S. J.; SLATER, B. K. Fuzzy and Isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant alley. *Geoderma*, v.77, p. 137-154, 1997.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *Applied geostatistic* New York : Oxford University Press, 1989.
- ISSAKA RF, ISHIDA F, KUBOTA D, WAKATSUKI T. 1997. Geographic distribution of selected soil parameters of inland valleys in West Africa. *Geoderma* 75:99-116.

JARVIS, A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. Guevara. 2006. Hole-filled SRTM for the globe Version 3. Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m. Disponível: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>.

JENKS, George F., Generalization in Statistical Mapping. Março 1963. Disponível no Endereço: <<http://www.jstor.org/pss/2569134>> Acesso:24/02/10.

JENNY, H. 1941. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw – Hill, New York.

JENNY, H. 1980. The soil resource: origin and behavior. New York: Springer – Verlag, 377p.

JOHNSON, D.W.; CHENG. W.; BURK, I.C. 2000. Soil Sci. Soc. Am. J. 64. p.1503 – 1514.

JOHNSON, C. E.; RUIZ-MENDEZ, J. J. AND LAWRENCE, G. B. 2000. Forest Soil Chemistry and Terrain Attributes in a Catskills Watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1804-1814

JOURNEL, A.G.1987. Geostatistics for the Environmental Sciences. Project No. CR 811893. Env. Monitoring Systems Lab., Stanford Univ., Las Vegas, 135 pp.

JOURNEL, A. G. and HUIJBREGTS, Ch. J. 1978. Mining geostatistics. Academic Press, London, 600p.

LAGACHERIE, P. 2008. Digital Soil Mapping: A State of the Art. In. Digital Soil Mapping with Limited Data. Org.: Hertmink, A.E.; McBratney, A.; Mendonça-Santos, M.L. Ed.Springer. 3-14p.

LAGACHERIE, P. AND MCBRATNEY, A.B. 2007. Spatial Soil Information System and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. Chapter 1. Lagacherie, P.; McBratney, A.B. and Voltz, M. (Editors). Elsevier B.V. All rights reserved. Developments in Soil Science, volume 31.

LAL, (2007). Soil science and the carbon civilization. Source: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL. Volume: 71 Issues: 5, 1425-1437p.

LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo, Ed. UNESP, 1998. 226p.

LEPSCH, I. F. 2002. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 178p.

Leica Geosystems. 2003. ERDAS Tour Guide, version 8.5. GIS & Mapping, LLC, Atlanta, GA. 638p.

LILBURNE, L.R.; HEWETT, A.E.; McINTOSH, P.D. LYNN, I.H. 1998. GIS-drive models of soil properties in the high country of the South Island. In "Proceedings SIR 98-10th annual colloquim of the Spatial Informations Research Centre". University of Otago, New Zealand, 16-19, Novembro. 173-180pp.

LOPES, A. S. Manual de fertilidade do solo. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177 p.

LUMBRERAS, J.F; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P.E.F.; PALMEIRI, F.; CALDERANO, S.B.; BARUQUI, A. M.; PEREIRA, N.R.; NAIME, U.J.; LEMOS, A.L. 2004. Macropedoambientes da Região Noroeste Fluminense – uma contribuição ao planejamento ambiental. Documentos – n64. Embrapa Solos. 21p.

KEY, J. MASLANIK, J.A & SCHWEIGER, A.J. 1989. Classification of merged AVHRR and SMMR artic data with neural networks. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.55, p 1331-1338.

KING, G.J., ACTON, D.F. AND ST. ARNAUD, R.J. (1983) Soil-landscape analysis in relation to soil distribution and mapping at a site within the Weyburn association. Can. J. Soil Sci., 63:657-670.

KLINGEBIEL, A. A.; HORVARTH, E. H.; MOORE, D. G.; REYBOLD, W. U. Use of slope, aspect, and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil surveys. Madison: Soil Science Society of America. 1987.

KNOTTERS, M., BRUS, D., VOSHAAR, J., 1995. A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. Geoderma 67 (3-4), 227-246.

KOCHIAN, L.V. 1995. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, v.46, p.237-260.

KRAVCHENKO, A. N. M G. P. ROBERTSON, X. HAO, AND D. G. BULLOCK. 2006. Management Practice Effects on Surface Total Carbon: Differences in Spatial Variability Patterns. Agron. J. 98: 1559-1568.

KULLBACK, S.; LEIBLER, R.A. 1951. "On Information and Sufficiency". The Annals of Mathematical Statistics. 22 (1): 79-86p.

MACEDO, J.R.; CAPACHE, C.L.; MELO, A.S. BHERING, S.B. 2005. Recomendações Técnicas para a Produção do Tomate Ecologicamente Cultivado – TOMATEC. Embrapa. Rio de Janeiro. 10p.

MACMILLAN, R. A. LandMapR© software toolkit - C++ version: user manual. Edmonton: LandMapper Environmental Solutions, 2003. 110 p.

MACKIE, PAUL. 2000. WORLD RESOURCES INSTITUTE: Global study reveals new warning signals: Degraded agricultural lands threaten world's food production capacity. Disponível em: <<http://archive.wri.org/news.cfm?id=76>>. Acesso: 27/10/09

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E., VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, Potafos, 201 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de . Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MALLOWS, C. L. 1964. Some comments on C., Technometrics 15: 661-675p.

MANSUR, K.L.; MEDEIROS, F.; VIEIRA H.; MARTINS, A.M.; PRADO, R.B.; MENEZES, J.M.; SILVA, G.C.J. Avaliação preliminar: geologia e alguns parâmetros da qualidade da água subterrânea nas microbacias de Santa. Maria/Cambiocó e Barro Branco. In: WORKSHOP DE INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES OBTIDAS NO ÂMBITO DO PROJETO PRODETAB AQUÍFEROS, 1., 2006, Rio de Janeiro. Anais ... Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

MARIN, F. RICARDO. Agência de Informação Embrapa. Cana-de-açúcar. EMBRAPA. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html. Acesso: 13/04/2010

MARIN, F. RICARDO. Solos do Brasil e a cana-de-açúcar. Embrapa. Parque Estação Biológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html>. Acesso: 13/04/2010.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London, Academic Press, 1995. 889p.

MATHERON, G., 1965. Les variables regionalisées et leur estimation. Masson, Paris.

MATSUMOTO, H. 2000. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. International Review Cytology, San Diego, v.200, p.1-46.

MCBRATNEY, A.B. (1994). Allocation of new individuals to continuous soil classes. Australian Journal of Soil Resources 32: 623-633p.

MCBRATNEY, A. B., DE GRUIJTER, J. J. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragades. *J. Soil Sci.*, v. 43, p. 159-176, 1992.

MCBRATNEY, A.B., MENDONÇA-SANTOS, M.L. AND MINASNY, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*,117:3-52p.

MCBRATNEY, A. B., ODEH, I. O. A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, v.77, p. 85-113, 1997.

MCBRATNEY, A.B., ODEH, I.O.A., BISHOP, T.F.A., DUNBAR, M.S., SHATAR, M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293–328.

MCBRATNEY, A.B. AND WEBSTER, R. 1981. The design of optimal schemes for local estimation and mapping of regionalized variables – II. *Computer Geosciences*, 7: 335-336p.

MCDANIEL P.A., BATHKE G.R., BUOL S.W., CASSEL D.K., FALEN A.L. Secondary manganese/iron ratios as pedochemical indicators of field-scale throughflow water movement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992;56:1211-1217.

MCINTOSH, BJ, TM SAMOCHA, ER JONES, AL LAWRENCE, DA MCKEE & S HOROWITZ & A HOROWITZ. 2000. The of a bacterial supplement on the high - density culturing of *Litopenaeus vannamei* with low - protein diet on outdoor tank system and no water exchange. *Aquacultural Engeengering*, 21: 215 - 227.

MELLO, A. F. de et al. *Fertilidade do Solo*. 3 ed. São Paulo: Nobel, 1989. 400 p.

MENDONÇA-SANTOS, M. L., H. GILBERTO DOS SANTOS, ET AL. (2006). Chapter 3 The State of the Art of Brazilian Soil Mapping and Prospects for Digital Soil Mapping. *Developments in Soil Science*, Elsevier. Volume 31: 39-54, 601.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. SANTOS, H.G; DART, R.O.; PARES, J.G. 2007a. Modelagem e mapeamento digital de estoque de carbono orgânico na camada superficial dos solos (0-10 cm) do Estado do Rio de Janeiro – Dados eletrônicos – Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/conhecimentos.html>>. Acessado em 15/04/2009.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. SANTOS, H.G; DART, R.O.; PARES, J.G. 2007b. Mapeamento digital de classes de solos no Estado do Rio de Janeiro. – Dados eletrônicos – Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 28p. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/conhecimentos.html>>. Acessado 18/05/2009.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. SANTOS, H.G; DART, R.O.; PARES, J.G. 2008. Digital Mapping of Soil Classes in Rio De Janeiro State, Brazil: Data, Modelling and Prediction. A.E. Hartemink et al. (eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*, Springer . 381-396p.

MEURER, E.J. Fundamentos de Química do Solo. 3ª Ed. Editora Evangraf. Porto Alegre. 2006. 285p.

MIRANDA, F.R., R.E. YODER, J.B. WILKERSON, AND L.O. ODHIAMBO. 2005. An autonomous controller for site-specific management of fixed irrigation systems. *Comput. Electron. Agric.* 48:183–197

MONTGOMERY, C.D. AND RUNGER, G.C. 2003. *Estatística aplicada e probabilidade para engenharia*. 2 ed. São Paulo:LTC.

MOORE, I.D., GESSLER, P.E., NIELSEN, G.A., PETERSON, G.A., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal* 57, 443–452p.

MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A. R. 1991. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, v. 5, p. 3-30.

MOREIRA, F.L.M.; MOTA, F.O.B.; CLEMENTE, C.A.; AZEVEDO, B.M. & BOMFIM, G.V. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. *R. Ci. Agron.*, 37:7-12, 2006.

MYNENI, R.B., et al. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.33,n02,p.481-486, 1995.

NASA. 2007. [NASA home page]. Disponível em: <<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>>. Acesso em: 2 maio 2007.

NASA. 2009. [NASA home page]. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: 22 nov. 2009.

NASCIMENTO, G. B., et al. 2004. Avaliação de propriedades edáficas em solos de tabuleiros costeiros da região norte do Rio de Janeiro. *Agronomia*, v.38, n°.1, p.37 – 44.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. 1999. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federa de Viçosa, Viçosa, MG. 399p.

NÚÑEZ, J. E. V.; SOBRINHO, N. M. B. A.; MAZUR, N. Conseqüências de diferentes sistemas de preparo do solo sobre distribuição química e perdas de fósforo de um Argissolo. **Bragantia**, v. 62, n. 01, p. 101-109, 2003.

ODEH, I., MCBRATNEY, A.B., CHITTLEBOROUGH, D.J., 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma* 63 (3– 4), 197– 214pp.

ODEH, I.O.A.; MCBRATNEY, A.B.; CHITTLEBOROUGH, D.J. 1995.a. Terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma* 67: 215-226pp.

ODEH, I.O.A., MCBRATNEY, A.B., CHITTLEBOROUGH, D.J. 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma* 67, 215–225p.

OLIVEIRA, J.B. JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. 1992. Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento. 2ed. Jaboticabal: FUNEP, 201p.

OLIVEIRA, S.N; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; MARTINS, E.S; SILVA, T.M.; GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F. 2007. Identificação de unidades de paisagem e sua implicação para o ecoturismo no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia* - Ano 8, nº 1. p.87-107.

OLIVEIRA, et al. 2005. Manutenção e correção da fertilidade do solo para inserção do cerrado no processo produtivo. *Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos, Goiás*, v.1, n.1, p. 50-64.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. *Advances in Agronomy*, New York, v. 30, p. 1-50, 1978.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Toxicity of aluminium to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO₃, MgCO₃ and CaSO₄. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p.1201-1207, 1982.

PENNOCK, D.J. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. *Soil & Tillage Research*. New York: Elsevier. v. 69, p. 15–26. 2003.

PENNOCK, D. J. & DE JONG, E. (1990) Rates of soil redistribution associated with soil zones and slope classes in southern Saskatchewan. *Can. J. SoilSci.* 70, 325-334.

PEREZ, L.E.P. *Nutrição Mineral de Plantas*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2007. 30p.

PEBESMA, E., 2003. Gstat: multivariable geostatistics for s. *Distributed Statistical Computing, working papers*. Vienna, Austria, pp. 1 – 11. Endereço: <<http://www.ci.tuwien.ac.at/Conferences/DSC-2003/>>. Acesso 18/01/2010.

PHILLIPS, O. L., MALHI, Y., VINCETI, B., BAKER, T., LEWIS, S.L., HIGUCHI, N., LAURANCE, W.F., NUÑEZ VARGAS, P., VÁZQUEZ MARTINEZ, R., LAURANCE, S., FERREIRA, L.V., STERN, M., BROWN, S., GRACE, J., 2002. Changes in Growth of Tropical Forests: Evaluating Potential Biases. *Ecological Applications*, v.12, n.2, pp. 576–587.

PIMENTEL-GOMES, F. *Curso de estatística experimental*. 13.ed. Piracicaba: Nobel, 1990. 468p.

- PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G., L. H.; ANJOS, C.; MACHADO, P. L. O. A. 2004. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em paty do alferes (RJ). R. Bras. Ci. Solo, 28:731-737.
- PONTELLI, C.B. Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas da agricultura de precisão. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 112p.
- POZZA, A.A.A.; GUIMARÃES, P.T.G.; ROMANIELLO, M.M.; POZZA, E.A. & CARVALHO, J.G. 2002. Suprimento de fósforo na produção e intensidade da cercosporiose de mudas de cafeeiro em tubetes. Ci. Agrotec., 26:5:970-976.
- PRADO, H. 2001. Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação e levantamento. 2ª Ed. Jaboticabal: Funep.
- QI, F., ZHU, A.X., HARROWER, M., BURT, J.E., 2006. Fuzzy soil mapping based on prototype category theory. Geoderma 136 (3-4), 774-787.
- RAIJ, B. van. Mecanismos de interação entre solos e nutrientes. In: RAIJ, B. van., (ed.). Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1981. p.17-31.
- RAIJ, V.B. 1983. A avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba: Franciscana. 142p
- RAIJ, B. V.1991. Fertilidade do Solo e Adubação. Ceres, Patafos. Piracicaba - São Paulo. p. 343.
- RAIJ, B. 2004. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no Brasil. In: YAMADA,T; ABDALLA,S.R.S. Ed. Fósforo na agricultura Brasília. Piracicaba: Potafos,563-587pp.
- RAIJ, B. V.; SACCHETTO, M. T. D.; IGUE, T. Correlações entre o pH e o grau de saturação por bases nos solos com horizonte B textural e horizonte B latossólico. Bragantia, Campinas, v.27, p.193-200, 1968.
- RAHMAN, A. H. A.; DAHAB, M. H.; MUSTAFA, M. A. Impact of soil amendments on intermittent evaporation, moisture distribution and salt redistribution in saline-sodic clay soil columns. Soil Science, v.161, p.793-802, 1996.
- RAMALHO FILHO, A e Pereira, L.C. Aptidão agrícola das terras do Brasil: potencial de terras e análise dos principais métodos de avaliação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999, 39p.
- REINDS, G.J., VAN OIJEN, M., HEUVELINK, G.B.M., KROS, H., 2008. Bayesian calibration of the VSD soil acidification model using European forest monitoring data. Geoderma 146, 475-488.

REZAEI, S. A., R. J. GILKES, 2005, The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. *Geoderma*, 125: 145-154.

RIBEIRO, S. R. A. Integração de imagens Landsat TM e dados auxiliares para a delimitação automática de unidades fisionômicas (paisagem) e geológicas usando redes neurais artificiais. Curitiba, 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

ROLIM NETO, F.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, L.M.; CORRÊA, M.M.; FERNANDES FILHO, E.I. & IBRAIMO, M.M. 2004. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto do Paranaíba (MG). *R. Bras. Ci. Solo*, 28:953-964.

ROMANO, N., SANTINI, A., 1999. Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation approach: experimental verifications and numerical studies. *Water Resources Research* 35, 3343-3359.

ROSSI, R. E., DUNGAN, J. L., BECK, L. R. 1994. Kriging in the shadows: geostatistical interpolation for remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, v.49, p. 32-40.

SALL, J.P. (1990), "Leverage Plots for General Linear Hypotheses," *American Statistician*, 44, (4), 303-315.

SANCHEZ, PEDRO A.; PALM, CHERYL A.; BUOL, STANLEY W. 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma* 114, p.157– 185

SANCHEZ, PA & SALINAS, JG 1981. Baixa entrada de tecnologia para a gestão Latossolos e Argissolos na América tropical. *Avanços em Agronomia* 34: 279-406

SANGCHYOSWAT, C.; YOST, R.S. 2002. Predicting Soil Properties Landscape Attributes with a Geographic Information System. *CMU. Journal Oficial*. vol. 1(3).

SANTOS, H.G; FIDALGO, C.C.E; COELHO, M.R.; ÁGLIO, M.L.D. 2006. Embrapa Arroz e Feijão. Sistemas de Produção. nº07. Disponível: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltasMatoGrosso/solos.htm#ava>. Acesso: 25/04/2010.

SCHAETZL, R.J. 1990. Effects of treethrow microtopography on the characteristics and genesis of Spodosols, Michigan, USA. *Catena* 17:111–126.

SCHLINDWEIN, J.A. & ANGHINONI, I. 2000. Variabilidade espacial de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:85-91.

SCHWERTMAN, N.C. e Silva, R. 2007. Identifying outliers with sequential fences. *Comput. Statist. & Data Anal.* 51: 3800-3810p.

SHARPEY, A.N.; HALVORSON, D.A. The management of soil phosphorus availability and its impact on surface water quality. In.: LAL, R. and STEWART, B.A. Soil processes and water quality. Madison, American Society of Agronomy, 1994. P.7-89.

SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrofico arenico. Rev. Bras. Cienc. Solo, Vicoso, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003.

SIMBAHAN, G.C., A. DOBERMANN, P. GOOVAERTS, J. PING AND M.L. HADDIX, 2006. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. Geoderma, 132: 471-489.

SOKAL, R. R. AND F. J. ROHLF. 1995. Biometry, 3rd ed. Freeman: San Francisco. 887 pp.

SORENSEN, RASMUS (2009) Influence of topography and forestry on catchments. Doctoral diss. Dept. of Aquatic Sciences and Assessment, SLU. Acta Universitatis agriculturae Sueciae vol. 2009:85.

STONE, L.F.; PEREIRA, A.L. Sucessão arroz-feijão irrigado por aspersão: Efeitos do espaçamento entre linhas, adubação e cultivar na produtividade e nutrição do arroz. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.29, n.11, p.1701-13, 1994.

SOUZA, D.M.G. & LOBATO, E. 2004. eds. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, Embrapa, 416p.

SOUZA, C.K.; MARQUES JR., J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de uma latossolo em Jaboticabal-SP. Engenharia Agrícola, v. 23, n. 3, 2003, p. 486-495.

Spring. 1996. "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling" Camara G, Souza RCM, FreitasUM, Garrido J Computers & Graphics, 20: (3), May-Jun. 395-403pp

StatSoft, Inc. (2002). STATISTICA for Windows [Computer program manual]. <http://www.statsoft.com>

STEIN, M. L., 1999. Interpolation of Spatial Data: Some Theory for 59 Kriging. Series in Statistics. Springer, New York, p. 247.

STEVENSON. F.J. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients. New York, John Wiley & Sons, 1986. 380p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D. et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre : Emater/RS – UFRGS, 2002. 126 p.

TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; BORKERT, C. M. Nutrição da Soja. In: Cultura da soja nos cerrados. Piracicaba: POTAFOS, 1993, P. 105-136.

TELLES, E.C.C. 2002. Dinâmica do carbono no solo influenciado pela textura, drenagem, mineralogia e carvões em florestas primárias na região centro-oeste da Amazônia. Piracicaba. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. São Paulo. 92p.

TISDALE, S.L., AND W.L. NELSON. 1956. Soil fertility and fertilizers. Macmillan, New York.

TSAI, C.; SANCHEN, Z.; DUH, C.; HORNG, F.2001. Prediction of Soil profile using regression model: a Case Study on Forest Soils in Southern Taiwan. Proc. Natl. Sci. Council. ROC (B)Vol. 25, No. 1, pp. 34-39.

TSUI, CHUN-CHIH; CHEN, ZUENG-SANG; HSIEH, CHANG-FU. 2004. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. Geoderma. 123. p.131-142.

TUKEY, J.W. 1977. Exploratory Data Analysis. New York. Addison-Wesley, Reading, MA.

TOMÉ Jr., J. B. 1997. Manual para interpretação de solo/ J. B. Tomé Jr. - Guaíba: Agropecuária, 247p.

TOMLIN, D. Geographic information systems and Cartographic Modeling. New York: Prentice Hall, 1990.249 p.

TRANI, E. RAIJ. 1997. Brócolos, couve-flor e repolho. In: VIDIGAL, S. M. et al. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, 2 ed. Atual. Campinas: fundação IAC, p. 175, (Boletim Técnico 100).

UNEP/GRID-Arendal. Agriculture land use distribution - croplands and pasture land. UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. 2007. Disponível: <<http://maps.grida.no/go/graphic/agriculture-land-use-distribution-croplands-and-pasture-land1>>. Acesso: 11/ 05/09.

UNEP/GRID-Arendal. Losses in land productivity due to land degradation. Maps and Graphics Library. 2009, Edited by Joel Benoit. Disponível em: <<http://maps.grida.no/go/graphic/losses-in-land-productivity-due-to-land-degradation>>. Acesso: 20/0/2009.

VALICHESKI, R.R. Atributos químicos do solo, estado nutricional e desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em duas classes de solos sob diferentes níveis de compactação e umidade. 2008, 99 f. il. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2008

VIEIRA, S.R. et al. 1995. Curso de atualização em conservação do solo: geoestatística. Campinas: AIC, 2v.

WANG, Y. ZHANG, X.; HUANG, C. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Geoderma*. V. 150, Issues 1-2, 15 April 2009, Pages 141-149

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of some physical properties of the soil. In: Hill, D. ed. *Applications of soil physics*, New York: Academic Press, 1980, Cap. 13, p. 319-344.

WEBSTER, R.; BURGESS, T.M. Sampling and bulding strategis for estimating soil properties in small regions. *Journal of Soil Science*. Edinburgh, v.35, n.1, p.127-140, 1984.

WEBSTER, R.G. AND MCBRATNEY, A.B. 1989. On the Akaike information criterion for choosing models for variograms of soil properties. *Jour. of Soil Scien*, 40:. 493-496p.

WEIRICH NETO, P.H.; SVERZUT, C.B.; SCIMANDEIRO, A. 2006. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema de plantio direto considerando variabilidade espacial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. vol.10 no.2 Campina Grande Apr./June. p.1415-4366.

WHITINGTON, G. 1994. Phosphorus leaching through a texture contrast soil under high and low irrigation rates. níveis de irrigação. BSc (Hons) Thesis, Flinders University of South Australia. BSc (Hons) Thesis, Flinders University of South Australia

WILDING, L.P. (1985) Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: *Soil Spatial Variability*, pp.166-194.

WILSON, J. P; GALLANT, J. G. 2000. (Ed.). *Terrain analysis: principles and applications*. Hoboken: J. Wiley,. 512 p.

WOJCIECHOWSKI, J.C. (2006). *Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual*. Pós-Graduação em Geomática. Dissertação de Mestrado. Área de concentração em Tecnologia da Informação. Universidade Federal de Santa Maria _ UFMS, RS. 88p.

ZHU, A.X ; HUDSON, B; BURT, J.; LUBICH, K.; SIMONSON, D. Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic. *Soil Science Society of America Journal*. v.65, p.885-894, sep/oct 2001.

ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), FCA/UNESP, 2001. 114p.

