

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

João Eduardo da Silva Pereira

Tese para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

João Eduardo da Silva Pereira
Zootecnista

Trabalho realizado no Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental (MODELAGE – DEMIN) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre
2009

Este trabalho foi julgado adequado como tese de doutorado em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa, e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Adelir Strieder

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivo H. Schneider (PPGEM – UFRGS)

Prof. Dr. Marco Túlio Menna Barreto de Vilhena (IMAT – UFRGS)

Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva (CCNE - UFSM)

Prof. Dr. Carlos Alberto da Fonseca Pires (CCNE – UFSM)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho ao mestre, professor e amigo Luis Eloi Pinto Ferreira que, apesar de já ter partido, ainda influencia com seus ensinamentos e exemplo de vida todos aqueles que tiveram o privilégio de conhecê-lo.

Dedico-o também a minha esposa Tânia e a meus filhos Thales, Luís e Ana.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr. Adelir Strieder, pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Ao Professor Dr. José Luiz Silvério da Silva, pelas valiosas contribuições.

À colega Janete Pereira Amador por sua ajuda na revisão e formatação deste trabalho.

Aos meus familiares, pela compreensão e apoio.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
LISTA DE APÊNDICES.....	xiv
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 Ferramentas estatísticas.....	4
2.2 Ferramentas de aquisição de dados.....	8
2.3 Ferramentas de identificações de padrões	14
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1 Caracterização da pesquisa.....	16
3.2 Descrição da área de estudo.....	16
3.3 Coleta de dados.....	21
3.4 Procedimentos de análise.....	23
3.4.1 Estudo univariado.....	23
3.4.2 Estudo multivariado.....	26
3.4.3 Metodologia de identificação de padrões.....	27
3.4.4 Trabalho de campo.....	29
4 RESULTADOS.....	30
4.1 Medidas descritivas das variáveis.....	30
4.2 Estudo descritivo da variável magnetometria (Mag).....	32

4.3 Estudo descritivo da variável contagem total (CT).....	37
4.4 Estudo descritivo da variável potássio (K).....	43
4.5 Estudo descritivo da variável tório (Th).....	47
4.6 Estudo descritivo da variável urânio (U).....	53
4.7 Estudo descritivo das formações geológicas.....	59
4.8 Estudo multivariado.....	62
4.8.1 Estudo descritivo das variáveis transformadas com base nos fatores obtidos através da análise de componentes principais.....	64
4.8.2 Estudo comparativo das variáveis transformadas em função das formações geológicas.....	67
4.9 Sistema de identificação de padrões.....	79
5 DISCUSSÃO.....	85
6 CONCLUSÕES.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

Lista de Figuras

Figura 2.1 Espectro de radiação Gama natural.....	12
Figura 3.1 Localização da região de estudo.....	18
Figura 3.2 Mapa geológico da região de abrangência do estudo na Folha Santa Maria (1:250.000), referência: UTM Datum H. SAD-69 MG.....	19
Figura 3.3 Mapa de sobreposição dos pontos amostrados e das formações geológicas.....	21
Figura 4.1 Histograma de frequência da variável magnetometria (nT).....	32
Figura 4.2 Comportamento espacial da variável magnetometria (nT).....	33
Figura 4.3 Dispersão das médias da variável magnetometria (nT).....	36
Figura 4.4 Histograma da distribuição da variável contagem total (micro-Roentgen/hr).....	38
Figura 4.5 Comportamento espacial da variável contagem total (micro-Roentgen/hr).....	39
Figura 4.6 Dispersão das médias de contagem total para as diferentes formações geológicas e zona urbana (micro-Roentgen/hr).....	43
Figura 4.7 Histograma de frequência da variável potássio (%).....	44
Figura 4.8 Comportamento espacial da variável potássio.(%).....	45
Figura 4.9 Gráfico da dispersão das médias da variável potássio (%) para as diferentes formações geológicas da área de estudo.....	47
Figura 4.10 Histograma de frequência da variável tório (ppm).....	48
Figura 4.11 Comportamento espacial da variável tório(ppm).....	49
Figura 4.12 Dispersão das médias da variável tório (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	53
Figura 4.13 Histograma de frequência da variável urânio (ppm)	54
Figura 4.14 Comportamento espacial da variável urânio (ppm)	55
Figura 4.15 Dispersão das médias da variável urânio (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	59
Figura 4.16 Medidas descritivas das variáveis F_1 , F_2 e F_3	65

Figura 4.17 Gráfico de Box & Whisker da variável raio.....	66
Figura 4.18 Histograma de frequência da variável raio.....	67
Figura 4.19 Dispersão das médias de F1 para as diferentes formações geológicas.....	70
Figura 4.20 Dispersão das médias de F2 para as diferentes formações geológicas.....	73
Figura 4.21 Gráfico da dispersão das médias de F3 para as diferentes formações geológicas.....	76
Figura 4.22 Gráfico da dispersão das médias de raio para as diferentes formações geológicas.....	79
Figura 4.23 Mapa de localização dos padrões identificados.....	83
Figura 5.1 Variação secular da localização do baixo magnético terrestre e da Intensidade do Campo Magnético Total para os anos de (A) 1945, (B) 1975 e (C) 2005.....	85
Figura 5.2 Dispersão das médias da intensidade de magnetização remanescente (A) e resíduo da filtragem de Sinal Analítico (B) nas diferentes formações geológicas na região de Santa Maria (RS).....	86

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Coluna estratigráfica da região em estudo e representação da zona urbana.....	20
Tabela 3.2 Principais parâmetros do projeto Camaquã.....	22
Tabela 4.1 Medidas descritivas individualizadas das variáveis Mag (nT), CT (micro-Roentgen/hr), Th (ppm) e U (ppm).....	31
Tabela 4.2 Correlações entre as variáveis Mag (nT), CT (micro-Roentgen/hr), K (%) Th (ppm) e U (ppm).....	31
Tabela 4.3 Resumo da análise de regressão múltipla (<i>Step-wise</i>) da Mag (nT) em função de CT (micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm).....	34
Tabela 4.4 Medidas descritivas da variável Mag (nT) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	35
Tabela 4.5 Comparação e significância entre as médias da variável Mag (nT) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	37
Tabela 4.6 Resumo da análise de regressão múltipla (<i>Step-wise</i>) da variável contagem total em função de CT(micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm).....	40
Tabela 4.7 Medidas descritivas da variável CT (micro-Roentgen/hr) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	41
Tabela 4.8 Comparação e significância entre as médias da CT (micro-Roentgen/hr), para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	42
Tabela 4.9 Medidas descritas da variável K (%) para as formações geológicas da área de estudo.....	46
Tabela 4.10 Níveis de significância para as comparações entre as médias da variável K (%) das diferentes formações geológicas presentes na área de estudo.....	46
Tabela 4.11 Análise de regressão múltipla (<i>Step-wise</i>) da variável Th (ppm) em função de CT (micro-Roentgen/hr), K (%) e U (ppm).....	50
Tabela 4.12 Medidas descritivas da variável Th (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	51
Tabela 4.13 Comparação entre as médias da variável Th (ppm) para as	

diferentes formações geológicas e zona urbana.....	52
Tabela 4.14 Análise de regressão múltipla (<i>Step-wise</i>) da variável U (ppm) em função de CT (micro-Roentgen/hr), K (%) e Th (ppm).....	56
Tabela 4.15 Medidas descritivas da variável U (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	57
Tabela 4.16 Comparação entre as médias da variável U (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.....	58
Tabela 4.17 Medidas descritivas da Formação Geológica Rio do Rasto.....	60
Tabela 4.18 Medidas descritivas da formação geológica 2 (Depósitos Aluviais Atuais).....	61
Tabela 4.19 Medidas descritivas da Formação Geológica Grupo Rosário do Sul.....	61
Tabela 4.20 Medidas descritivas da Formação Geológica Serra Geral α_1	61
Tabela 4.21 Medidas descritivas da Formação Geológica Formação Serra Geral β_1	61
Tabela 4.22 Medidas descritivas da formação geológica Formação Botucatu.....	62
Tabela 4.23 Resultado da análise fatorial de componentes principais.....	63
Tabela 4.24 Resultado da análise fatorial de componentes principais aplicando uma rotação do tipo <i>Varimax</i>	63
Tabela 4.25 Medidas descritivas das Variáveis F_1 , F_2 e F_3	64
Tabela 4.26 Estatística descritiva da variável raio.....	66
Tabela 4.27 Medidas descritivas da variável F1 para as diferentes formações geológicas.....	68
Tabela 4.28 Comparação entre as médias da variável F1 para as diferentes formações geológicas.....	69
Tabela 4.29 Medidas descritivas da variável F2 para as diferentes formações geológicas.....	71
Tabela 4.30 Comparação entre as médias da variável F2 para as diferentes formações geológicas.....	72
Tabela 4.31 Medidas descritivas da variável F3 para as diferentes formações geológicas.....	74

Tabela 4.32 Comparação e significância entre as médias da variável F3 para as diferentes formações geológicas.....	75
Tabela 4.33 Medidas descritivas da Variável Raio para as diferentes formações geológicas.....	77
Tabela 4.34 Comparação entre as médias da Variável Raio para as diferentes formações geológicas.....	78
Tabela 4.35 Medidas descritivas das variáveis Mag (ppm), CT (micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm).....	80
Tabela 4.36 Correlações entre as variáveis Mag (ppm), CT (micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm).....	80
Tabela 4.37 Correlações parciais e coeficientes de regressão múltipla (<i>Step-wise</i>).....	81
Tabela 4.38 Medidas descritivas dos três primeiros autovalores gerados pela análise fatorial.....	82
Tabela 4.39 Correlação entre os escores dos fatores.....	82
Tabela 4.40 Valor dos centróides e número de observações para subespaço de classificação.....	83
Tabela 4.41 Médias das variáveis geofísicas e escores por padrão de classificação.....	84
Tabela 5.1 Composição média das rochas vulcânicas (básicas e ácidas), e arenitos intertrápicos da Fm. Botucatu na região de Sobradinho-Salto do Jacuí.	91

Lista de Símbolos

UTM Universal Transversa de Mercator

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

CNP - Conselho Nacional do Petróleo

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CT – Contagem Total

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

K – Potássio

Mag – Magnometria

nT – nanotesla

NUCLEBRÁS - Empresas Nucleares Brasileiras

PETROBRAS - Petróleo Brasileiro

Th - Tório

U - Urânio

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria.

Lista de Apêndices

APÊNDICE A Sequência de programas, em linguagem do MatLab, empregados na análise dos dados.....	109
APÊNDICE B Padronização dos dados.....	111
APÊNDICE C Cálculo da solução inicial para dimensão ótima dos subespaços.....	114
APÊNDICE D Otimização através do método simplex, modificado.....	117
APÊNDICE E Imprime resultados.....	118

RESUMO

O presente trabalho foi realizado na região de Santa Maria, no Estado do Rio Grande do Sul, extremo Sul do Brasil. Tem o objetivo de avaliar o comportamento de variáveis geofísicas de gamaespectrometria e magnetometria, oriundos do Projeto Camaquã (Área 1) do Serviço Geológico do Brasil, em função dos diferentes materiais geológicos da região. Com o emprego do suporte computacional Statistica 7.1, licenciado para o Departamento de Estatística da UFSM, foram efetuadas análises estatísticas uni e multivariadas dos dados geofísicos associados a distintos grupamentos de rochas sedimentares, pertencentes à Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, e também às rochas vulcânicas (básicas e ácidas) pertencentes à Formação Serra Geral. A área do estudo situa-se na borda da Bacia do Paraná. Dentro desse contexto, foi possível definir valores característicos de média, erro padrão e intervalos de confiança para cada uma das variáveis em estudo, em cada uma das formações geológicas, proporcionando, através de comparação de médias, mostrar que se podem distinguir diferentes unidades geológicas por meio da análise estatística de dados aerogeofísicos. O comportamento das variáveis, quando avaliadas em função das coordenadas geográficas, evidenciou relações de dependência espacial que seguem modelos polinomiais de segunda ordem. A análise estatística multivariada fatorial das variáveis geofísicas padronizadas mostrou-se uma ferramenta eficiente para a redução do número de variáveis do problema, e permitiu o desenvolvimento de um sistema de classificação eficiente para identificação de padrões distintos de ocorrência conjunta das variáveis, respeitando as características de não estacionaridade espacial de média e variância.

Palavras-chave: integração de dados, estatística, análise multivariada, aerogeofísica.

ABSTRACT

The present work was prepared at Santa Maria region, southern Brazil, Rio Grande do Sul State. Which the objective to evaluate the behavior of geophysics variables of airborne gamma-ray and magnometry from Survey of Brazil/*Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais* in *Camaquã* Project./CPRM 1973 in function of different geologic units, sedimentary and volcanic (acid and basic types). Through the use of the Statistica 7.1 computational support, licensed to *UFES*, were done, unvaried and multivariate statistical analysis in geophysics data, associated to different groups of volcanic rocks, belonged the central depression of Rio Grande do Sul state and/or to volcanic rocks belonged to *Serra Geral* formation at border of *Paraná* Basin Inside this context was possible to define characteristic values from mean standard error and confidence interval for all variables in each geologic formation, to carryout, through mean comparison, to distinguish different geologic formation by statistical analysis of geophysics data. The variables behavior, when evaluated in relation to geographic coordinates of the Universal Transverse Mercator system, presented spatial dependency that following polynomial models of second order. The multivariate statistical analysis of standardized geophysics data by factorial analysis was a efficient toll to reduce the number of variables of the problem and allowed to develop a efficient classification system for identify different kinds of conjunct behavior of the variables, respected the characteristic of spacial non stationary in mean and variance.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os dados dos levantamentos geofísicos mais antigos do Brasil (desde 1952) foram transformados do padrão analógico para o digital por meio do Projeto AERO da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006). O processamento e utilização desses dados no formato digital têm alcançado novas linhas de investigação, tanto pelos profissionais de geofísica, da própria CPRM, quanto por instituições de pesquisa brasileiras. Ao mesmo tempo, novas técnicas de processamento e de análise estão sendo empregadas.

Os levantamentos aerogeofísicos brasileiros, em sua grande maioria, utilizaram e utilizam os métodos gamaespectrométricos e magnetométricos. A gamaespectrometria consiste na detecção dos raios gama emitidos por isótopos radioativos presentes na superfície terrestre, visando à estimativa da sua quantidade (Wilford *et al.*, 1997; Bastos, 2002). Os radioelementos naturais que emitem radiação gama e que são detectados nos levantamentos geofísicos são o potássio (K), o tório (Th) e o urânio (U). Além das emissões devidas a esses radioelementos, as emissões totais de radiação gama da superfície terrestre também são medidas contagem total (CT).

Os dados obtidos por levantamentos gamaespectrométricos têm sido utilizados intensamente em pesquisa mineral (Quadros, 2000), em estudos ligados à geomedicina (Buffon, 2002). Já Blum *et al.* (2001) e Sapacuaia (2002) os usaram em trabalhos de mapeamento geológico. Essas investigações utilizam basicamente a integração de dados de diferentes fontes. Carmelo e Menezes (1996) comentam que na década de 70, a integração era basicamente visual e a quantidade de informações utilizadas era reduzida, pois todo o processo de integração e análise dos resultados era desenvolvido pelo pesquisador. Assim, o resultado final obtido era, principalmente, devido à experiência e à capacidade de observação do pesquisador, e a metodologia utilizada possuía características pessoais.

A partir da disseminação dos computadores pessoais, os sistemas e os algoritmos computacionais começaram a ser desenvolvidos para tratar e analisar grande volume de

informações e processar toda a diversidade de dados obtidos por diferentes fontes. Os procedimentos e técnicas matemáticas mais utilizados na área das Geociências, principalmente no Ocidente, têm base nos trabalhos de Boham-Carter (1996) os quais se fundamentam em determinados aspectos da lógica matemática. Quadros (2000) utilizou modelamentos numéricos, probabilísticos e não-probabilísticos, para estimar depósitos minerais. Mais recentemente, as técnicas e as operações da lógica matemática aplicadas às Geociências e às Ciências Ambientais ganharam um espectro mais amplo em Sirotinskaya & Strieder (2006). Por outro lado, as técnicas matemáticas ligadas à análise estatística bem como suas aplicações em Geociências são relatadas nos trabalhos de Albarède (1995), Goovaerts (1997) e Deutsch (2002). Salienta-se que esse campo da estatística aplicada ainda pode ser explorado em maior profundidade.

De acordo com CPRM (2007), com o advento do imageamento da Terra por sensores transportados por satélites, abriu-se a possibilidade da análise de grandes áreas em escalas regionais, permitindo a caracterização do comportamento espectral de materiais terrestres, de forma que significa um importante avanço na discriminação de rochas e minerais. Os dados quantitativos produzidos por esses sensores, na forma de números digitais proporcionais à reflectância dos materiais, medida em cada banda, podem ser processados através de rotinas computacionais específicas, em que a aplicação de técnicas de realce e classificação permite a distinção entre alvos.

No Brasil, os trabalhos pioneiros com esse novo sistema foram os de Paradella et al. (1990), Rolim et al. (1993), Almeida Filho & Castelo Branco (1992), entre outros. A técnica de aerogamaespectrometria normalmente utilizada na integração de dados consiste em medir a produção de raios gama que são emitidos no decaimento dos elementos radioativos (Wilford et al., 1997). Algumas áreas do Estado do Rio Grande do Sul possuem levantamentos aerogeofísicos executados na década de 1970. A Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) criou o Projeto AERO com o intuito de fornecer informações técnicas sobre todas as fases dos principais levantamentos aerogeofísicos executados no Brasil desde 1952. A divisão de geofísica da CPRM possui, em seus bancos de dados, sob o código de série 1010, o Projeto Camaquã que contém dados da região central do Estado do Rio Grande do Sul. Os dados fornecem informações sobre os níveis de intensidade magnetométrica (Mag),

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Contagem Total de emissões radioativas (CT), emissões radioativas de Potássio (K), emissões radioativas de Tório (Th) e emissões radioativas de Urânio (U), referenciados geograficamente através de coordenadas Transversal Universal de Mercator (UTM) CPRM (2006).

A aplicação ou a utilização dos dados aerogeofísicos em processos de integração de dados tem crescido nos últimos anos (Buffon, 2004). No entanto, as técnicas de análise dos dados, como empregadas nesses trabalhos, podem ser ainda largamente exploradas, de modo que novos resultados ou aplicações possam emergir.

Esta tese, portanto, tem por objetivo desenvolver uma metodologia de análise univariada e multivariada que permita identificar padrões diferenciados de ocorrências conjuntas das variáveis geofísicas, de forma a mapear a ocorrência dessas variáveis na região Central do Estado do Rio Grande do Sul, para que esses padrões sirvam de suporte para futuros estudos relacionados com variáveis geológicas, pedológicas, epidemiológicas e de produção agropecuária, dentre outros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura que embasa o presente trabalho, tanto em relação às ferramentas estatísticas clássicas, quanto em relação às ferramentas estatísticas utilizadas em áreas específicas como séries temporais e geociências. A revisão de literatura constitui-se na segunda seção do texto. Nesta parte, como o próprio nome está dizendo, o autor faz uma revisão da literatura existente sobre o assunto a ser tratado, trazendo informações de outros autores, com a citação de cada fonte consultada.

2.1 Ferramentas estatísticas

O conjunto de ferramentas estatísticas empregadas como auxiliares na investigação científica possui a propriedade de medir o erro na tomada de decisão quando a mesma é baseada em dados experimentais. A maioria dos modelos estatísticos assume como pressuposto a independência entre as observações experimentais. Porém, quando se trabalha com dados ordenados segundo a sua posição relativa, esse pressuposto não pode ser atendido já que existe uma tendência de variação conjunta de observações próximas. Esse problema possui um campo bem definido de pesquisa dentro da estatística, que é denominado séries temporais; trata a correlação dos dados em função do tempo ou da frequência, definindo uma relação unidirecional. Outro campo de pesquisa em que esse problema se apresenta é a geoestatística, em que a dependência espacial, ao contrário das Séries Temporais, pode ocorrer em várias direções (PEREIRA, 2006).

Segundo Kriege (1951), a geoestatística originou-se na área de mineração. Ela analisa e infere valores de uma variável distribuída no espaço e/ou no tempo, como: concentração de poluentes, variação do teor de zinco no solo, preço do petróleo no tempo, entre outros. Ainda segundo Kriege (1951), os procedimentos para aplicação de técnicas geoestatísticas inclui: (a)

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

análise exploratória dos dados, (b) análise estrutural, (c) cálculo e modelagem do variograma e (d) realização de inferências de *krigagem* ou simulação.

O sucesso e as suposições das técnicas geoestatísticas estão fundamentados na teoria das variáveis regionalizadas, desenvolvida por Matheron (1963; 1971). Essa teoria considera que as variáveis distribuídas no espaço ou no tempo podem ser vistas como uma função aleatória, ou um processo aleatório, ou um campo aleatório, ou um processo estocástico. Essa teoria concretiza o alicerce da geoestatística.

Para Burrough (1987), a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de três componentes: a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e c) um ruído aleatório ou erro residual.

Segundo Druck et al.(2004), compreender a distribuição espacial de fenômenos constitui-se hoje num desafio para a elucidação de questões importantes em diversas áreas do conhecimento, como saúde, ambiente, geologia, agronomia, entre outras. Esses estudos estão se tornando cada vez mais comuns, devido à disponibilidade de sistemas de informação geográfica de baixo custo com interfaces amigáveis, que permitem realizar a reapresentação espacial de variáveis como população de indivíduos, índices de qualidade de vida ou vendas de uma empresa numa região por meio de mapas. Para isso, basta dispor de um banco de dados e de uma base geográfica confiável, como um mapa de municípios georreferenciados. O Sistema de Informação Geográfica permite a visualização do padrão espacial determinado pelo fenômeno em observação por meio de um mapa.

Ainda segundo Druck et al.(2004), o objetivo da análise espacial é mensurar propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo de forma explícita. Segundo o autor, a análise espacial é composta por um conjunto de procedimentos encadeados, cuja finalidade é escolher um modelo inferencial que mostre o relacionamento espacial presente no fenômeno. Os procedimentos iniciais para a análise incluem um conjunto de métodos genéricos de análise exploratória, e a visualização dos dados, em geral, através de mapas. Essas técnicas permitem descrever a distribuição das

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

variáveis de estudo, identificar observações atípicas não só em relação ao tipo de distribuição, mas também em relação aos vizinhos e inferir a existência de padrões na distribuição espacial. Por meio desses procedimentos, é possível estabelecer hipóteses sobre as observações, de forma a selecionar o modelo mais adequado para os dados. O modelo inferencial é determinado por procedimentos estatísticos que, dependendo de uma ou mais variáveis respostas serem analisadas conjuntamente, podem ser univariado ou multivariado.

Para Pereira (2001), a estatística multivariada é um vasto campo do conhecimento que envolve uma multiplicidade de conceitos estatísticos e matemáticos, os quais dificilmente podem ser perfeitamente dominados por pesquisadores de outros campos de conhecimento, pois é a rigor qualquer abordagem analítica que considere o comportamento de muitas variáveis simultaneamente. As diversas técnicas de regressão múltipla são nesse sentido uma forma de análise multivariada. No entanto, há para o termo um *stricto sensu* que se refere a um conjunto de técnicas em particular, incluindo, entre outras, análise de agrupamento, escalonamento multidimensional, análise fatorial e análise de correspondência.

A análise de agrupamento estuda o agrupamento de objetos numa sequência linear de aglomeração, enquanto que o escalonamento multidimensional estuda a distribuição espacial dos objetos, de forma a reconhecer agrupamentos e relações entre eles. A análise fatorial é aplicada na identificação de fatores num conjunto de medidas realizadas, e a análise de correspondência é utilizada para examinar relações geométricas do cruzamento de variáveis categorias.

Um dos mais desafiadores problemas na análise de dados multivariados é a dimensão do conjunto de dados, em geral muito grande. Esse problema requer frequentemente a redução do conjunto de variáveis para um conjunto menor que possua menos variáveis ou novas variáveis. O conjunto das novas variáveis deve ser uma função do conjunto original e conter uma proporção significativa do total das informações disponíveis. Khattree e Naik (2000) consideram essencial a redução das dimensões dos dados em um processo de análise exploratória.

A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica multivariada baseada na

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

explicação da estrutura de covariância por meio de poucas combinações lineares das variáveis originais em estudo. O objetivo principal dessa análise é a redução da dimensão original, com a finalidade de melhorar a interpretação das análises efetuadas. Para tanto, busca-se estimar a maior parte da variação de um sistema de “p” variáveis através de um número $r < p$ de componentes (JONHONSON e WICHERN, 1998).

A ACP é uma técnica que possibilita investigar um grande número de dados. Possibilita, também, identificar as medidas responsáveis pelas maiores variações entre os resultados e transforma o conjunto de dados originais em um outro conjunto, denominado de componentes principais, com a menor perda de informação possível, eliminando variáveis que possuam pouca informação (SOUZA e VICINI, 2005).

A ACP é uma técnica de análise intermediária, portanto não se constitui em um método final e conclusivo. Esse tipo de análise serve, fundamentalmente, como um passo intermediário para a aplicação de técnicas, como análise de regressão múltipla, análise de agrupamento, e como estimadores de fatores em análise fatorial (JONHONSON e WICHERN, 1998).

A análise fatorial é uma técnica de análise multivariada que, embora também sirva para a redução da dimensão do problema, está mais preocupada em explicar a estrutura das covariâncias entre as variáveis, utilizando um modelo estatístico casual e pressupondo a existência de “q” variáveis não observadas e subjacentes aos dados, os fatores, que expressem o que existe de comum nas variáveis originais (REIS, 1997).

De acordo com Silva (2003), nos últimos anos muitas pesquisas foram realizadas para melhorar a qualidade dos dados no Sistema de Informação Geográfico (SIG), com o objetivo de reduzir os desvios e a variância de medidas que a Matemática ainda não conseguiu descrever, satisfatoriamente, os dados espaciais. Por isso, segundo o mesmo autor na integração de dados de forma não determinística, uma ferramenta robusta e de fácil aplicação computacional é a lógica *fuzzy* que teve seu início na década de 60, porém suas primeiras aplicações ocorreram em 1974.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

Do ponto de vista de Mendel (1995), a lógica *fuzzy* é um mapeamento não linear de um vetor de dados de entrada, com uma saída escalar, ou seja, um sistema de entradas múltiplas e saídas simples. A vantagem desse sistema é que existe um grande número de possibilidades de diferentes mapeamentos, porém sua aplicação requer um minucioso entendimento da técnica e dos elementos que compreendem esse sistema. Pode ser utilizado para: controlar aeronaves; transmissão automática de dados; pontos críticos de controle, controle de elevadores, análise e controle de estoques de mercado; análise de sinais; ajustamento de cores na TV; focos de câmaras de vídeo, estabilização de imagens, etc.

2.2 Ferramentas de aquisição de dados

Conforme Zortea *et al.* (2005), o sensoriamento remoto é uma das mais importantes ferramentas de investigação utilizadas pelo homem, pois possui várias aplicações em diversas áreas do conhecimento científico. É uma técnica para obter informações sobre objetos ou fenômenos na superfície terrestre através de sensores, colocados em aeronaves e satélites, sem que haja contato físico entre eles. Esses sensores produzem fotografias ou imagens da distribuição de energia na superfície em determinadas faixas do espectro eletromagnético. Cada faixa é particularmente adequada à extração de um tipo de informação. Permite estudar o ambiente terrestre nos domínios espacial, temporal e espectral, por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes da superfície do planeta.

Um sistema sensor imageador produz uma imagem bidimensional da radiância, emitância ou retroespalhamento, num determinado instante, naquele espaço físico. Assim, as imagens produzidas são caracterizadas pela:

(a) resolução espacial: capacidade do sensor de detectar objetos a partir de uma determinada dimensão. Quanto maior a resolução do sensor, menor é o tamanho dos elementos que podem ser detectados individualmente. As variações espaciais são as fontes das diferenças de brilho entre os elementos da cena (*pixels*) e permitem o reconhecimento dos objetos através de contraste, textura e forma dos objetos;

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

(b) resolução espectral: capacidade que o sensor possui de registrar a radiação em diferentes regiões do espectro. Quanto melhor a resolução espectral, maior o número de bandas espectrais que podem ser adquiridas sobre os objetos da superfície, aumentando o poder de extração de informação. As variações da energia radiante com o comprimento de onda produzem a sensação de cor;

(c) resolução radiométrica: é a capacidade de discriminar entre diferentes intensidades de sinal ou número de níveis digital em que a informação se encontra registrada. Quanto maior for essa resolução, maior será a sensibilidade do sensor nas pequenas diferenças de radiação, aumentando o poder de contraste e de discriminação das imagens;

(d) resolução temporal: é a frequência com que a área de interesse é revisitada ou imageada. As variações temporais são causadas por mudanças de estações e ambiente ou efeitos causados pelo homem. Uma outra característica é a largura da faixa imageada, isto é, em 1896, o francês Antoine-Henri Becquerel observou que sais de Urânio emitiam raios, como os raios X. Essa descoberta acabou influenciando Marie Curie (1867-1934) na procura de um assunto para o seu doutorado. Assim, Marie Curie mediu esses raios e verificou a existência de outros elementos, além do Urânio, que emitem radiação. Esses trabalhos mudaram todo o arcabouço conceitual, pois foi verificado que a atividade radioativa dependia somente da quantidade de elementos radioativos (Buffon, 2002), largura da faixa de varredura, que varia de acordo com o satélite.

Os levantamentos gamaespectrométricos são executados a partir de sensores colocados em aeronaves suborbitais, com planos de vôo pré-definidos. Esses levantamentos também pertencem à elaboração de imagens da distribuição da produção de radiação H no terreno; são, portanto, imagens de sensores remotos, mas de natureza distinta daquele dos sensores orbitais.

A radioatividade, desde a sua descoberta, em 1896, vem sendo utilizada em pesquisa mineral e, recentemente, em mapeamento geológico. Dos 325 nuclídeos naturais, 274 são estáveis e 51 são instáveis. A maioria dos nuclídeos instáveis distribui-se em três famílias radioativas que se desintegram em cadeias: a família do Th^{232} , a família do U^{238} e a família do

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

U^{235} . Além dos radioelementos Urânio (U) e Tório (Th), o K^{40} também possui desintegração atômica natural. Durante o processo de desintegração, a emissão radioativa é constituída de partículas *alfa*, partículas *beta* e raios *gama* (ondas eletromagnéticas) (FERREIRA, 1993).

Uma partícula alfa consiste em dois prótons mantidos unidos por dois nêutrons para formar um núcleo estável de hélio. Emissões de partículas alfa são o principal processo de decaimento radioativo, resultando em um decréscimo de quatro unidades na massa atômica e de duas no número atômico. As partículas possuem alta energia cinética, porém são rapidamente bloqueadas por colisões com outros núcleos atômicos, ganhando rapidamente dois elétrons orbitais e se tornando indistinguíveis de outros átomos de hélio. A distância média percorrida na rocha sólida antes de isso ocorrer é medida em frações de milímetros.

As partículas Beta são elétrons ejetados do núcleo atômico. Diferem de outros elétrons somente por possuírem alta energia cinética, e só podem ser identificadas após múltiplas colisões. Energia é muito rapidamente perdida em colisões com outros elétrons. Em meio sólido ou líquido, a variação média das partículas Beta é medida em centímetros.

Raios Gama são ondas eletromagnéticas com frequências muito altas, de forma que são melhor consideradas como partículas, conhecidas como fótons, com energia proporcional à frequência. A variação de energia dos raios gama é considerada a partir de 0,1 Mev (frequência de $0,25 \times 10^{-20} \text{ Hz}$).

Devido à sua condição de neutralidade elétrica, os fótons penetram muito mais profundamente nas rochas do que as partículas alfa e beta, e são conseqüentemente os mais usados geologicamente (MILSON, 2003).

Nas medições gamaespectrométricas, mede-se a intensidade dos raios *gama* emitida por um elemento intermediário *filho* na série de desintegração e, essa é correlacionada com a concentração do elemento-*pai*, assumindo que existe uma relação direta entre o teor dos *filhos* e dos *pais*.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

As medidas de espectrometria gama feitas sobre amostras de solos e rochas permitem determinar, com precisão razoável e sem tratamento químico, os teores de Potássio, Urânio e Tório. A necessidade de tomar amostras para serem analisadas em laboratório representava uma limitação ao número de pontos a serem medidos por esse método. Por outro lado, a fraca absorção da radiação gama pela matéria e a possibilidade de usar no campo um detector e a eletrônica associada, permitiam praticar a espectrometria gama diretamente *in situ* com o detector localizado acima dos solos e rochas a analisar (FERREIRA, 1993)

Nos raios *gama* naturais, as contribuições do Tório e do Potássio são maiores que a do Urânio, exceto em áreas com concentrações elevadas deste último elemento. Esses são os principais radioelementos contribuintes para a radioatividade natural das rochas. Alguns dos fatores que influenciam as medidas de radiação *gama* são:

- (i) a cobertura de solo, 35 cm de solo são suficientes para absorver cerca de 95% da radiação;
- (ii) a umidade;
- (iii) (ii) a cobertura vegetal, que faz decrescer as contagens de U e Th, pode contribuir para a redução de até 15% do K, por esse ser passível de absorção pelas plantas;
- (iv) a topografia. A radioatividade das rochas devida ao Urânio e ao Tório provém de três fontes: minerais acessórios moderadamente radioativos; minerais essenciais fracamente radioativos; material radioativo localizado entre os grãos e em defeitos estruturais de minerais (Vasconcellos, 1994). A radioatividade das rochas devida ao K provém, principalmente, de minerais como: k-feldspato e micas.

O espectro de medição de radiação cósmica natural de raios gama pode ser observado na figura abaixo.

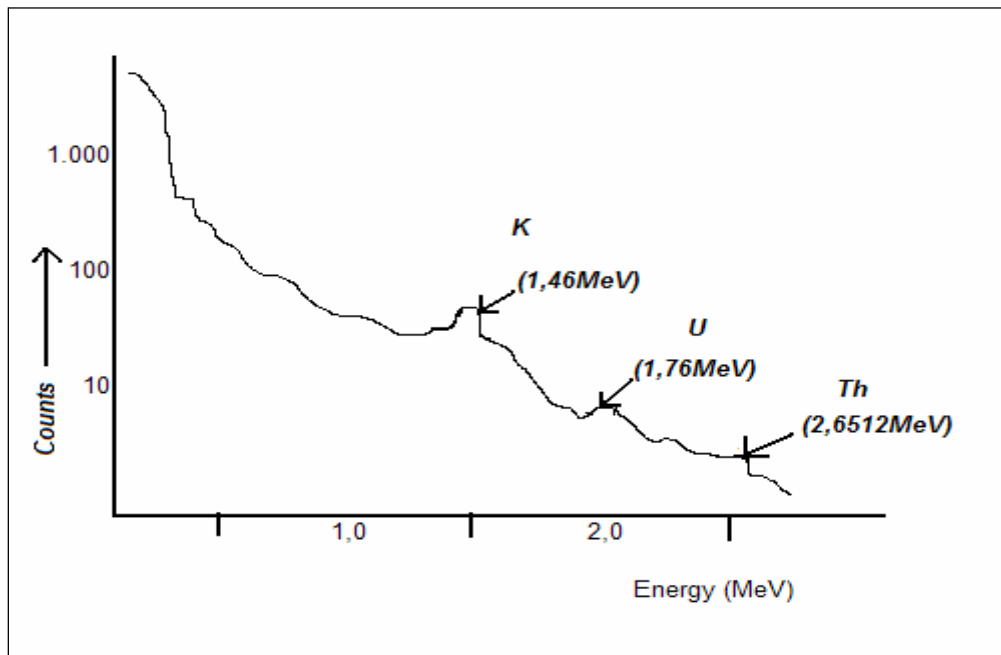


Figura 2.1 Espectro de radiação Gama natural (MILSOM, 2003).

Conforme Sapucaia (2004), o potássio, o urânio e o tório são litófilos e estão mais concentrados nas rochas ígneas ácidas do que nas rochas intermediárias básicas e ultrabásicas. O urânio e o tório constituem as três séries radioativas naturais, a do U^{238} ($T_{238} = 4,468\text{Ga}$), a do U^{235} ($T_{235} = 0,704\text{ Ga}$) e a do Th^{232} ($T_{232} = 14,01\text{ Ga}$), designados pelo radioisótopo-pai de cada série, em que os seus membros são emissores alfa e/ou beta e muitos desses também emissores gama.

Ainda segundo Sapucaia (2004), o urânio ocorre na crosta terrestre numa concentração média de 2,5 ppm sob a forma de dois isótopos primários nos percentuais de 99,3 % de U^{238} para 0,7 % de U^{235} . O tório tem somente um isótopo primário (Th^{232}) e é aproximadamente quatro vezes mais abundante que o urânio. O potássio aparece nas rochas numa concentração média de 2,5% distribuídos em três isótopos, K^{39} (93,258 %), K^{40} (0,0117 %) e K^{41} (6,730 %); o K^{40} é o único isótopo radioativo do potássio. O K^{40} tem uma meia-vida de 1,30 Ga, o que explica sua ocorrência natural.

O potássio é um dos principais componentes da crosta terrestre, com concentração média de 2,5 % na crosta continental e 0,4 % na crosta oceânica, pois o potássio é um álcali

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

que apresenta uma química simples. Os principais minerais à base de potássio são: (1) os feldspatos potássicos, principalmente o ortoclásio e a microclina, com aproximadamente 13 % de K; e (2) as micas, biotita e a moscovita, com aproximadamente 8 % de K. As rochas ácidas, como os granitos, sienitos, sienogranitos e leucogranitos, apresentam altos teores de potássio, enquanto que as rochas básicas, gabros, peridotitos, etc, apresentam baixos teores. Na gamaespectrometria, o potássio é detectado pelo fotopico da radiação de 1460 keV emitida no decaimento K^{40} , Ar^{40} . Esse radioisótopo constitui 0,01167% do potássio natural, logo sua determinação é uma medida direta do potássio contido no material investigado. Ao contrário do urânio e do tório, o potássio é um elemento muito frequente nos minerais, principalmente nos alumino-silicatos como os feldspatos potássicos e as micas.

O urânio participa nas rochas da crosta terrestre como elemento-traço, com uma concentração média de 2,5 ppm na crosta continental e 0,9 ppm na crosta oceânica. Ele apresenta uma química definida por dois estados de valência: (i) a forma oxidada U^{+6} , que em associação com complexos do tipo CO_3^{-2} , CO_4^{-2} , CO_4^{-3} , forma diversos minerais solúveis; e, (ii) a forma reduzida U^{+4} , geralmente contida nos minerais insolúveis. Pela espectrometria gama, o urânio é detectado pelas emissões gama do decaimento do Bi^{214} , membro da série U^{238} , particularmente pelo fotopico da radiação de 1760 keV, pressupondo existir equilíbrio radioativo na referida série. Por sua baixa abundância isotópica, o U^{235} e sua série não contribuem significativamente para a radiação gama de urânio, exceto nos minerais desse elemento.

O tório em estado natural contém apenas o radioisótopo Th^{332} (100 %). Aparece como um elemento-traço na crosta terrestre com uma concentração média de 5,8 ppm na crosta continental e 2,7 ppm na crosta oceânica. Ele ocorre nos estados de valência Th^{+4} e Th^{+3} , sendo esses raros na natureza e instáveis em ambiente aquoso. Nas rochas, o tório pode estar presente na alanita, na monazita, no xenotímio e no zircão com teores maiores que 1000 ppm. Pela espectrometria gama, o tório nas rochas é detectado pelas emissões gama do decaimento do Tl^{208} , principalmente a radiação de 2614 keV, que, por esse método, pressupõe o equilíbrio radioativo dos membros da série (FOWLER, 1992, *apud* SAPUCAIA 2004).

De acordo com Dickson e Scott (1997), os elementos K, U e Th mostram um relativo

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

aumento em seus teores, quando aumenta o teor de sílica nas rochas ígneas, além de uma considerável variação em função das características químicas, mineralógicas, petrográficas e estruturais. Vasconcellos et al. (1994) mostraram que a abundância desses elementos, principalmente o urânio e o tório, nas principais rochas ígneas, tanto básicas como ácidas, fundamenta-se em alguns fatores, como o teor de sílica, idade relativa e posição dentro de um único plúton. Dessa forma, os teores desses elementos, nas rochas ígneas, podem ter diversas origens. Nas rochas metamórficas, a distribuição desses elementos dependerá do protólito de origem da rocha atual. As rochas sedimentares geralmente refletem o conteúdo dos elementos da rocha fonte; se a rocha fonte apresentar composição granítica, em que são altos os teores de K, U e Th, possivelmente seus sedimentos terão altos teores desses elementos. Normalmente, nos sedimentos arenosos o teor de urânio é menor que 1 ppm devido à sua facilidade de lixiviação.

Para maiores informações sobre diretrizes básicas de radiproteção e dosagem máxima permissível, a partir da qual poderia haver lesões permanentes no corpo humano ver Buffon, 2002.

2.3 Ferramentas de identificações padrões

Reconhecimento de padrões em grandes e complexos bancos de dados, como os oriundos de levantamentos geofísicos, requerem uma alta capacidade de processamento, capacidade esta que é altamente dependente da eficiência da heurística empregada para classificação. (Walt and Barnard, 2006). Em geral, nestes casos são empregadas metodologias de classificação supervisionadas, como redes neurais e lógica fuzzy.

Para mapear a heterogeneidade de paisagens da região amazônica Ximenes em 2007, empregou redes neurais de uma camada de três neurônios, como metodologia de classificação para células de 2 km quadrados em função de parâmetros geofísicos da região, obtendo como resultado mapas de caracterização auto-organizáveis.

A metodologia fuzzy para reconhecimento de padrões de dados geofísicos tem sido

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.

largamente utilizada, o emprego destas técnicas foi originalmente proposta por Bezdek (1980) como um aperfeiçoamento de técnicas já existentes.

Em que pese a eficiência das técnicas de análise discriminante, redes neurais e de lógica fuzzy, o emprego de tais técnicas ainda é limitado devido à complexidade e ao esforço computacional exigido. Na grande maioria, os trabalhos que envolvem bancos de dados geofísicos multivariados são analisados através integração e sobreposição de mapas.

Nesse sentido, a análise fatorial, como metodologia auxiliar, pode ser uma ferramenta útil na classificação de padrões, na medida em que reduz a dimensão do problema e conseqüentemente a complexidade e o gasto computacional.

Análise fatorial tem sido ao longo do tempo aplicada em diferentes campos do conhecimento. Em medicina interna, análise fatorial é aplicada para reconhecimento de doenças, em tipificação celular, em identificação de origens proteicas e cristalografia molecular (e.g. Mathews et al., 1974; Gurevich et al., 2003; Morris, 2004; Checa, 2006); é aplicada em biometria e em reconhecimento de voz (e.g. Benall et al., 1994; Bouchrika and Nixon, 2002; Drexler et al., 2002; Prince et al., 2008). É também aplicada em análises químicas quantitativa (e.g. Bruin et al., 1972; Hsu et al., 1982; Jurs, 1986; Wirsz & Blades, 1986). Recentemente tem sido aplicada para estimativa de risco para autocombustão em gás e carvão (Zhang et al., 2008). Em todas essas áreas as técnicas de análise fatorial têm demonstrado ser uma ferramenta útil para metodologias de reconhecimento de padrões (e.g. Keysers et al., 2004; Nomoto et al., 2005; Zhang et al., 2008).

Em contraste, a análise fatorial vem recebendo pouca atenção em aplicações geológicas, principalmente no campo de mapeamento regional. Algoritmos de análise de componentes principais vem sendo aplicados em pacotes de softwares de sensoramento remoto (e.g. Pal et al., 2007; Koutsias et al., 2009). Porém metodologias de análise fatorial ou de componentes principais não vêm sendo aplicadas em banco de dados derivados de levantamentos aereo geofísicos.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da pesquisa

Este capítulo apresenta a caracterização da pesquisa e os procedimentos e as técnicas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de cunho quantitativo. Segundo Triviños (1987), as pesquisas de natureza quantitativa demonstram a intenção de garantir a precisão dos resultados, evitando-se distorções de análise e de interpretação. Elas possibilitam, em consequência, uma margem de segurança quanto às interferências. O estudo quantitativo pode gerar questões para serem aprofundadas qualitativamente e vice-versa.

A importância de tornar a geologia uma ciência mais quantitativa, com a inclusão de disciplinas básicas como física e matemática, e, por consequência, a estatística, é uma preocupação de autores como Krauskopf e Konrad (1972) desde meados do século passado. O desenvolvimento acelerado de técnicas estatísticas e computacionais implementadas a partir da segunda metade do século vinte torna essa idéia não só necessária como indispensável e de pesquisa permanente.

3.2 Descrição da área de estudo

A base de dados de Projetos Aerogeofísicos do Brasil, denominada AERO, foi criada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 1995. Seu principal objetivo é prover o usuário de informações técnicas sobre todas as fases dos principais levantamentos aerogeofísicos executados no Brasil desde 1952. Tendo em vista os diferentes patrocinadores desses projetos e procurando evitar superposições de áreas, os projetos foram agrupados e numerados por códigos como: 1000, 2000, 3000 e 4000. Os códigos da série e seus patrocinadores foram:

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

- Códigos da Série 1000 - projetos conduzidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e CPRM - Serviço Geológico do Brasil;

- Códigos da Série 2000 - projetos conduzidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e pela Empresas Nucleares Brasileiras S.A. (NUCLEBRÁS);

- Códigos da Série 3000 - projetos conduzidos pelos governos estaduais e empresas privadas;

- Códigos da Série 4000 - projetos conduzidos pelo Conselho Nacional do Petróleo (CNP) e pela Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e (CPRM/CETEM, 2005).

A Divisão de Geofísica (DIGEOF/DEGEO) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) digitou os dados magnéticos e gamaespectrométricos do projeto a partir das listagens de computador e as coordenadas geográficas (UTM) das fiduciais dos perfis com a finalidade de compor o "arquivo de dados XYZ" do projeto. Dessa forma, todo o Projeto Camaquã (Área I) teve seus dados digitados sob a forma de "arquivo XYZ" (formato Geosoft), em 1997.

Esse projeto teve seus dados radiométricos convertidos de "contagens por segundo" (cps) para concentração de elementos. Percentagem para K, parte por milhão para os equivalentes urânio tório e Microroentgen por hora para o Canal de Contagem Total, a partir da técnica denominada de *back-calibration*. Essa técnica foi transferida para a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) através do projeto *Brazil Airborne Radiometric Mapping Project (BARMP, 1997)*, de acordo com o Convênio de Cooperação Técnica celebrado em 17/10/1996 entre a CPRM e o *Geological Survey of Canada (GSC)*, com a participação da empresa canadense de consultoria em geofísica Paterson, Grant & Watson Limited (PGW), com o apoio financeiro da *Canadian International Development Agency (CIDA) - Project Number 204/13886 - Canada-Brazil Cooperation Project for Sustainable Development in the Minerals Sector (CPRM, 2006)*.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

A Figura 3.1 mostra a localização e a Figura 3.2 mostra o mapa geológico da região de abrangência desse estudo, respectivamente, produzido pela CPRM (1998).

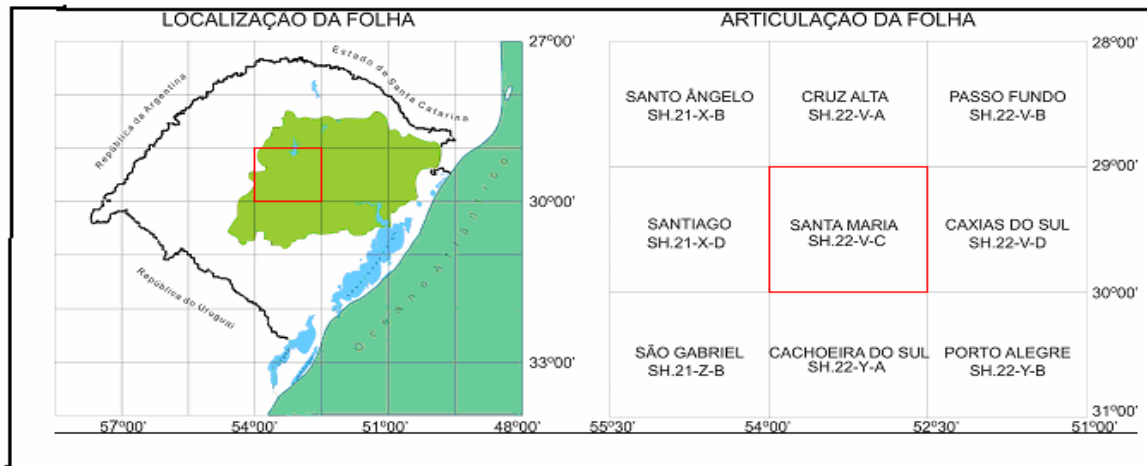


Figura 3.1 Localização da região de estudo.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

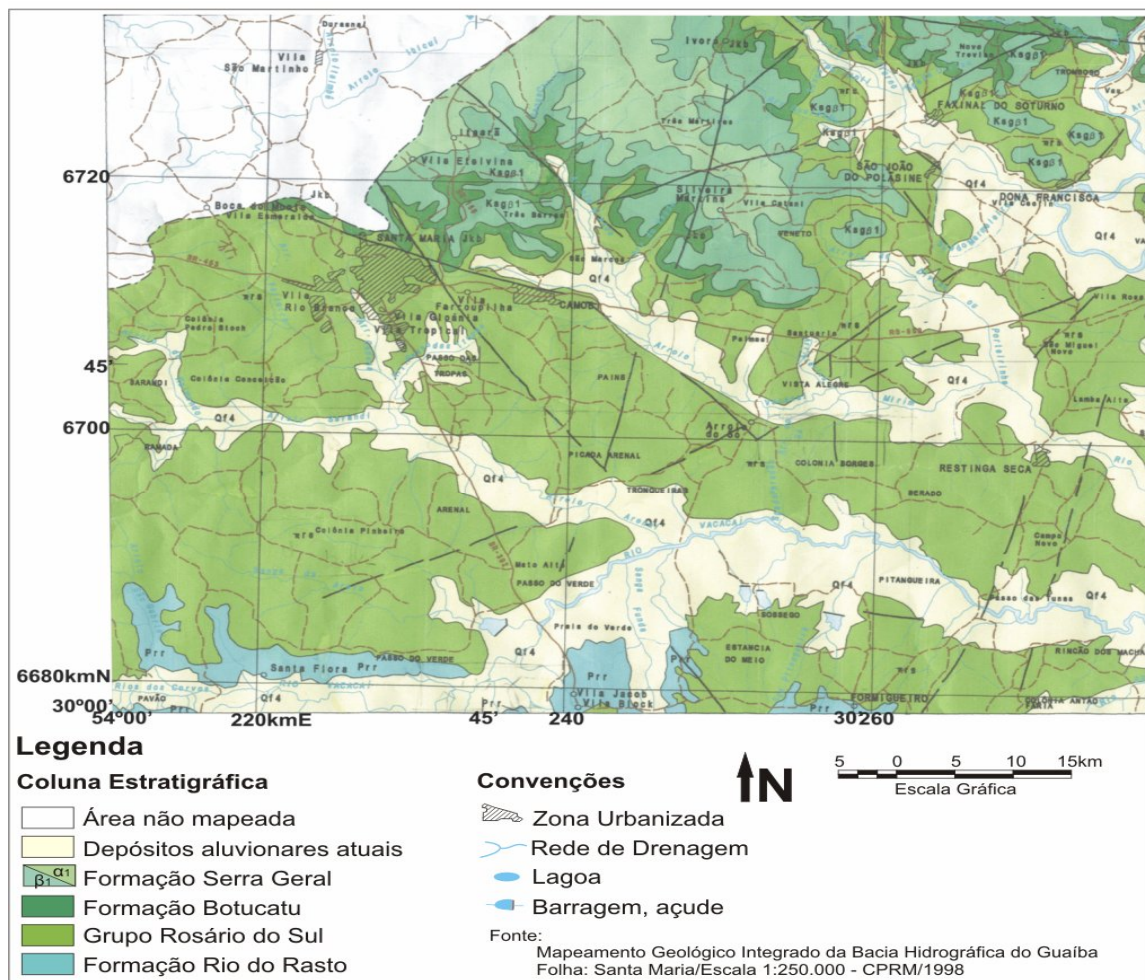


Figura 3.2 Mapa geológico da região de abrangência do estudo na Folha Santa Maria (1:250.000), referência: UTM Datum H. SAD-69 MG, CPRM (1998).

No mapa geológico representado na Figura 3.2, as diferentes cores representam as seguintes litologias contidas na Tabela 3.1. Essa tabela apresenta a coluna estratigráfica das formações geológicas aflorantes na área em estudo e às áreas de concentração urbana.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 3.1 Coluna estratigráfica da região em estudo e representação da zona urbana.

Cor	Código	Origem	Composição
Branco	Qf4	Cenozóico, Quaternário.	Depósitos aluvionares atuais – cascalhos, areias grossas e finas e sedimentos siltico-argilosos, inconsolidados que preenchem calhas de rios e suas planícies de inundação.
Verde Médio	Ksg β_1	Mesozóico, Cretáceo.	Formação Serra Geral – efusivas toleíticas básico-intermediárias e ácidas, intercalando na base arenitos eólicos intertraps: intrusões e derrames picríticos tipo Gravataí, sucedidos por basaltos tipo Gramado (β_1).
Verde Claro	Ksg α_1	Mesozóico, Cretáceo.	Formação Serra Geral – efusivas toleíticas básico-intermediárias e ácidas, intercalando na base arenitos eólicos intertraps interdigitando superiormente vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias (α_1).
Verde Escuro	JKb	Mesozóico, Jurássico.	Formação Botucatu – arenitos finos a médios, róseos-avermelhados, bem selecionados, bimodais, com estratificações cruzadas tangencial e plano-paralela de médio a grande porte.
Marrom	Rrs	Mesozóico, Triássico.	Grupo Rosário do Sul – arenitos arcossianos, siltitos e lamitos, com níveis de conglomerados intraformacionais, preservados como blocos abatidos em estruturas do tipo graben, arenitos avermelhados finos a médios com estratificações paralela e cruzada acanalada.
Azul	Prr	Paleozóico, Permiano.	Formação Rio do Rasto – arenitos finos, bem selecionados, lenticulares, argilitos e siltitos esverdeados, bordos ou avermelhados, com laminações paralela e cruzada acanalada.
Preto	Zu		Zona urbana

(Fonte CPRM 1998).

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

A Figura 3.3 ilustra as linhas de vôo em que foram amostrados os dados do presente trabalho e a sobreposição dessas nas diferentes formações geológicas.

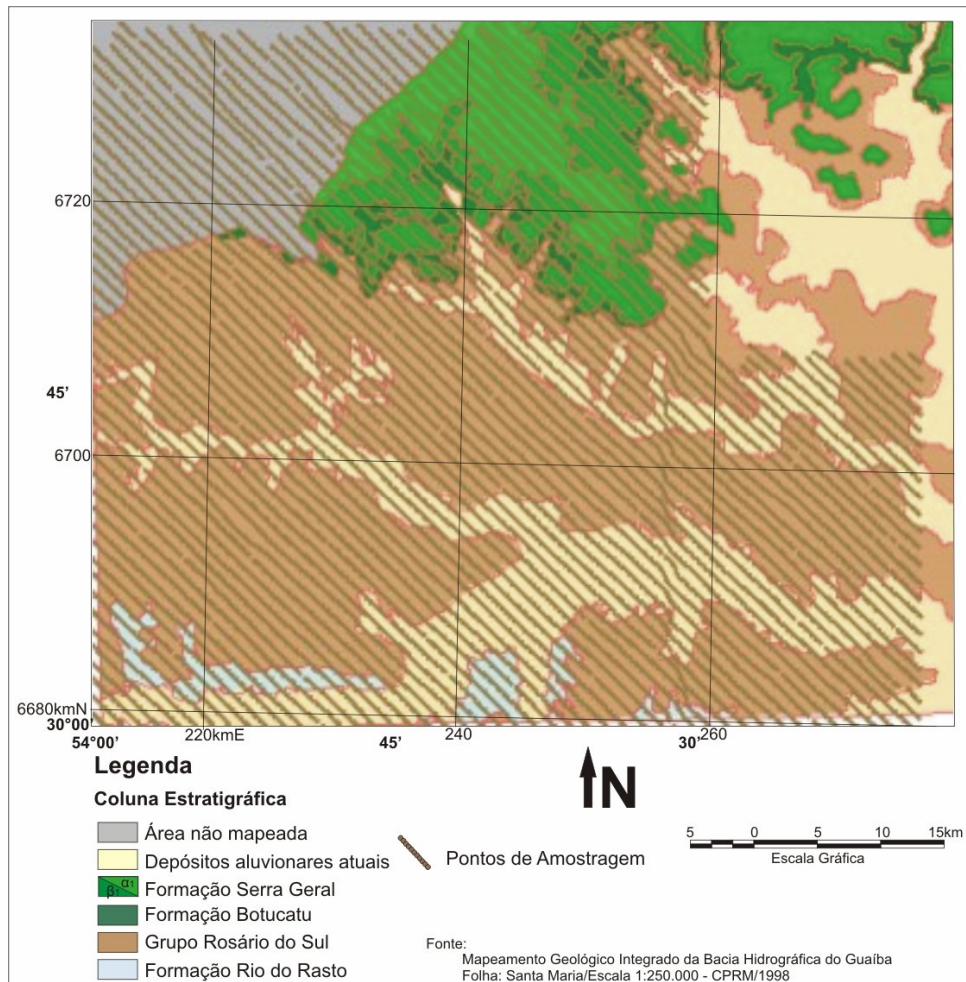


Figura 3.3 Mapa de sobreposição dos pontos amostrados e das formações geológicas.

3.3 Coleta de dados

Os dados foram obtidos do Projeto Camaquã, código de Série 1010, pertencente ao projeto AERO, criado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, em 1995. Esse projeto está localizado na região central do Estado do Rio Grande do Sul (Figuras 3.1 e 3.2).

A técnica adotada para o levantamento gamaespectrométrico utiliza um sensor radiométrico aerotransportado para detectar a radiação gama emitida pelos radioelementos presentes na superfície terrestre. As variáveis estudadas foram: os níveis de Magnetometria

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

(Mag), Contagem Total de emissões radioativas (CT), emissões radioativas de Potássio (K), emissões radioativas de Tório (Th) e emissões radioativas de Urânio (U), totalizando 25806 observações, referenciadas espacialmente em coordenadas UTM que variaram de oeste para leste desde 206190 até 276813 E e de norte para sul desde 6670888 até 6735665 N, perfazendo uma área de 4574,75 km². Os parâmetros de levantamento aerogeofísico do Projeto Camaquã são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Principais parâmetros do projeto Camaquã

Parâmetros	Unidades
Intervalo de Amostragem	1 segundo
Altura de vôo	150 metros
Direção e espaçamento das linhas de vôo (LV)	NW-SE, 1 Km
Direção e espaçamento das linhas de controle (LC)	NE-SW, 18 Km
Tempo de integração gama	2 segundos
Cristais de NaI (TI)	2491,59 pol. cúbicas

Fonte: Brasil-CPRM, 2006

3.4 Procedimentos de análise

3.4.1 Estudo univariado

O estudo descritivo dos dados foi conduzido por meio de medidas descritivas de média, valor máximo, valor mínimo, desvio padrão, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e coeficiente de variação para cada variável geofísica de estado: Magnetometria (nT), Contagem Total (Microroentgen/hora), Potássio (%), de Tório (ppm) e Urânio (ppm).

O objetivo desse estudo é entender o comportamento total e individual de cada variável em relação ao seu comportamento médio e aos níveis de variabilidade, os limites e a forma de distribuição.

Posteriormente, foi medida a correlação entre as variáveis através do coeficiente de correlação de Pearson, para descrever a variabilidade conjunta das variáveis duas a duas.

Para visualizar o comportamento da distribuição de cada variável foram construídos histogramas de frequências.

Os valores para as medidas descritivas, bem como os histogramas de frequências foram obtidos a partir da biblioteca *basic statistics/tables-descriptive statistics* e as matrizes de correlação a partir da biblioteca *basic statistics/tables-correlation matrices* do suporte computacional Statistica 7.0 da *StatSoft*.

Maiores informações sobre como estimar os valores das medidas descritivas, suas propriedades e como construir histogramas de frequências podem ser obtidas no manual eletrônico do programa Statistica 7.0 ou referências básicas como Pereira (2006), Bussab (1987), Mayer (1976).

Para descrever o comportamento de cada variável de estado em função de sua posição geográfica, foi ajustado um modelo polinomial para cada variável em função das

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

coordenadas em UTM de oeste para leste e UTM de sul para norte. Os componentes polinomiais que apresentaram significância estatística foram incorporados ao modelo. As funções polinomiais estatisticamente significativas foram empregadas para gerar gráficos de superfície que permitam visualizar o comportamento da variável em função de sua posição geográfica. Para permitir melhor visualização do comportamento de cada variável em função das coordenadas geográficas, que foram tomadas em unidades com valores muito superiores às unidades das variáveis, foi necessária uma transformação de unidades nos eixos, o que melhorou a visualização. Porém, tal artifício inviabiliza procedimentos de interpolação gráfica, que só são possíveis diretamente através do modelo.

As estimativas dos modelos polinomiais e os testes de significância para cada parâmetro e para o grau de cada polinômio, bem como a geração do gráfico resultante foram obtidos a partir da biblioteca *Advanced linear/Nonlinear Models-General Regression Models-Response Regression Surface* do suporte computacional *Statistica 7.0 da StatSoft*.

As técnicas de estimativas referentes a ajustes polinomiais, assim como inferências e testes de hipóteses relativos, podem ser obtidos em Gomes (1990), Neter e Wasserman (1974).

Cada variável de estado foi analisada em função do conjunto das outras variáveis através da técnica de regressão *Step-wise*.

O método de busca de regressão *Step-wise* é, provavelmente, o mais usado dos métodos por não requerer um esforço computacional expressivo para testar todos os modelos de regressão. Esse método foi desenvolvido para economizar esforço computacional, quando comparado com outras metodologias para ajuste de curvas de regressão, alcançando resultados consistentes na busca de um conjunto de variáveis independentes. Essencialmente, esse método visa, no conjunto de equações simples, a determinar a sequência mais adequada das variáveis independentes em uma equação de regressão múltipla, adicionando ou retirando variáveis do modelo a cada passo. O critério empregado para adicionar ou retirar variáveis independentes pode ser definido em função da soma dos quadrados dos erros, dos coeficientes de correlação parciais e valor da estatística F.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

As variáveis independentes com maior valor de F são candidatas prioritárias a entrar no modelo múltiplo. A cada passo, os valores de soma de quadrado dos erros e o coeficiente de correlação parcial são verificados para garantir a permanência ou não da variável no modelo. O procedimento prossegue até que não existam mais variáveis independentes que contribuam de forma significativa (NETER e WASSERMAN, 1974).

Os valores resultantes da análise de *Step-wise* referentes à ordem de entrada da variável, coeficiente de correlação múltipla e significâncias foram obtidos a partir da biblioteca *multiple linear regression* do suporte computacional *Statistica 7.0 da StatSoft*.

Após a análise exploratória de dados realizada para cada variável, o conjunto de dados foi dividido em distintas fontes de variação que correspondem às formações geológicas identificáveis na região de estudo. Para cada subconjunto de dados pertencentes a cada formação geológica, foram retiradas amostras de tamanhos variados de forma estratificada proporcional. Os dados de cada variável foram analisados em grupos da formação geológica a que pertencem (Tabelas 3.1 e 3.2). Essa separação em grupos foi realizada a partir do mapa da Figura 3.3 e espacializada através das coordenadas geográficas (UTM) dos dados.

Assim, os procedimentos estatísticos anteriores foram empregados novamente para cada variável dentro de cada formação geológica, com a finalidade de proceder às comparações entre os comportamentos gerais e os específicos de cada formação geológica.

As variabilidades de cada variável, dentro e entre cada formação geológica, foram testadas através da técnica estatística de análise de variância univariada, e os valores esperados foram comparados em função da formação geológica a que pertencem através do teste de *Tukey*. A visualização das diferenças entre médias de formações distintas foi apresentada através de gráficos de *Box e Whisker*.

As tabelas de análise de variância, de estimativas de médias e de níveis de significância para comparação de médias foram obtidas a partir da biblioteca *ANOVA- One-way Anova* do suporte computacional *Statistica 7.0 da StatSoft*.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Os procedimentos de estimação de parâmetros e construção de tabelas de análise de variância, bem como os processos de *post oc* para comparação de médias podem ser encontrados de forma detalhada em português em GOMES (1990) ou em autores clássicos como Cochran e Cox (1957).

3.4.2 Estudo multivariado

As variáveis de estado inicialmente foram submetidas a uma padronização do tipo $Z_i = (x_i - \bar{X}_i) / \sigma_i$, em que Z_i é o valor padronizado da variável original x_i em função da \bar{X}_i = média da variável e do σ_i = desvio padrão. O objetivo é evitar o trabalho conjunto com unidades que apresentem discrepâncias de magnitude, como aquelas encontradas no presente estudo, em que os valores de Magnetometria, Contagem Total e do conjunto Potássio, Tório e Urânio, foram tomados em unidades distintas e discrepantes entre si. Aplicações e propriedades de variáveis padronizadas podem ser obtidas em Davis (1973).

Com as variáveis padronizadas, foi aplicada a análise fatorial através do método de componentes principais, com a finalidade de que os escores gerados para os fatores F_i , com $i = 1, 2, \dots, n$, produzam variáveis aleatórias ortogonais de média zero e variância um (NETER e WASSERMAN, 1974). O intuito foi reduzir o número de variáveis do problema para no máximo três variáveis, de forma a facilitar os processos de visualização gráfica e interpretações. Assim cada observação amostral é constituída de um vetor $F_i = [f_1; f_2; f_3]$ $\in R^3$ pode ser interpretado geometricamente como um ponto em um espaço tridimensional.

Como cada f_i é ortogonal a todo f_j para $i \neq j$ e o vetor $[f_1; f_2; f_3]$ possui média

$\mu = [0; 0; \dots; 0]$ e variância $\sigma^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, foi definida a variável raio como

$r = \sqrt{f_1^2 + \dots + f_n^2}$ que transforma o problema de $R^3 \Rightarrow R$.

As variáveis f_i e o raio gerados foram submetidos aos mesmos procedimentos

descritivos aplicados às variáveis originais.

Para testar se as amostras de cada formação geológica fazem parte da mesma população, sobre as variáveis geradas foram aplicadas análises de variância univariada e multivariada em função das formações geológicas com as respectivas comparações de médias. A visualização entre os contrastes de médias foi apresentada através de gráficos de *Box e Whisker*.

As estimativas de variabilidade, os valores das variáveis padronizadas, os níveis de significância, as tabelas de médias, as tabelas com os níveis de significância para os contrastes entre médias e os gráficos de contrastes de médias foram obtidos através da biblioteca *ANOVA- One-way Anova* do suporte computacional *Statistica 7.0 da StatSoft*.

3.4.3 Metodologia de identificação de padrões

Com base nas variáveis geradas, foi desenvolvido o critério de classificação levando-se em conta que cada observação será a realização de uma variável aleatória Y , representada por um vetor $y_i = [f_1, f_2, \dots, f_k]$, que será tomado como um ponto no espaço k dimensional, com $k < 5$, com centro em $E(Y) = [0, 0, \dots, 0]$ e dispersão $V(Y) = I_{(k)}$.

Da Análise Fatorial foram selecionados os primeiros três fatores, assim cada observação gerou um ponto no espaço tridimensional.

Após, cada ponto y_i foi classificado em $r=6$ categorias diferentes em função de sua distância em relação a $E(Y)$, $d = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2}$. Dessa forma cada observação y_i vai pertencer a um subespaço $Y_j = [y_{ij}]$ com i variando de 1 até n_i e j variando de 1 até r , em que $\bar{y}_j = [\bar{f}_1, \bar{f}_2, \bar{f}_3]$ será o centróide do subespaço j e $V(y_i)$ a dispersão em torno de \bar{y}_j .

Sob essas condições, pode-se demonstrar que a dispersão total de y_i em relação a

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

, $E(Y)$ definida como $\sum_{i=1}^n (y_i - E(Y))^2$, pode ser decomposta em duas partes, uma em função da dispersão de y_{ij} em torno de cada centróide \bar{y}_j e outra em função da dispersão de \bar{y}_j em torno de $E(Y)$.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - E(Y))^2 = \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 + \sum_{i=1}^n (\bar{y}_j - E(Y))^2.$$

Admitindo-se que $\sum_{i=1}^n (\bar{y}_j - E(Y))^2$ é a parcela da dispersão total de Y

$\sum_{i=1}^n (y_i - E(Y))^2$ que foi capturada pelo processo de classificação, então a variável R^2 , definida como:

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - E(Y))^2}.$$

pode ser tomado como uma medida da eficiência do processo de classificação. Dessa forma, para maximizar o processo de classificação para cada y_i , foi atribuída a pertinência a um subespaço Y_j , de forma a maximizar R^2 , através do seguinte esquema de otimização:

Minimizar a função objetivo.

$$\sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_j)^2.$$

Sujeito às restrições:

$$j = 6$$

$$n_i > 2 \dots \dots \dots \forall \dots i .$$

$$\sum_{ik=1}^r \bar{y}_{jk}^2 = 1, \dots \forall \dots j$$

Os valores iniciais de \bar{y}_j foram obtidos a partir do ordenamento das y_i observações em função das distâncias entre duas observações. Sendo y_{i+1} a observação que se encontra a menor distância de y_i , a observação y_1 , foi definida como a de menor distância em relação a $E(Y)$.

Após o ordenamento, a distância entre y_1 e y_n foi dividida pelo número de classes de classificação, $j = 6$, dividindo o espaço de observações em 6 subespaços Y_j cada um com n_i observações e $k = 3$ fatores.

Os valores iniciais de cada \bar{y}_j serão dados por $\sum_{i=1}^{n_i} y_{ij} / n_i$.

3.4.4 Trabalho de campo

Realizou-se uma visita de campo para identificar as formações geológicas aflorantes na área de estudo com o auxílio de um aparelho de “Global Position System” (GPS) e do mapa geológico da CPRM (1998). Porém, não foram realizadas coletas de materiais geológicos em campo, mas foram incluídos resultados obtidos nessas mesmas formações por Silvério (1997), Heemann (1997) e Strieder e Heemann (2006).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para as variáveis Magnetometria (Mag), Contagem Total (CT), Potássio (K), Tório (Th) e Urânio (U), como medidas descritivas individualizadas, como estimativas geradas em função das fontes de variação. Serão apresentados também os resultados para as variáveis F_1, F_2 e F_3 , que são variáveis subjacentes geradas a partir da análise fatorial das variáveis originais, como medidas descritivas individualizadas, e como vetores de estimativas geradas em função das diferentes formações geológicas. Por fim, será desenvolvida uma metodologia de identificação dos diferentes padrões de ocorrência conjunta das variáveis F_1, F_2 e F_3 dentro de cada formação geológica.

4.1 Medidas descritivas das variáveis

As medidas descritivas individualizadas para as variáveis Mag (em nT), CT (em micro-Roentgen/hr), K (em %), Th(em ppm) e U (em ppm) estão apresentadas na tabela 4.1. Para melhor compreensão o roentgen é definido como a quantidade de radiação produzida por uma unidade eletrostática de carga (2.08×10^9 pares de íons), capaz de provocar uma ionização no ar seco, sob pressão e temperatura normais, por cm^3 . Observou-se que as variáveis CT, K, Th e U possuem um alto grau de variabilidade relativa, enquanto que a variável Magnetometria possui uma baixa variabilidade em torno da média, ou seja, 0,3%. Todas as variáveis apresentam distanciamento da distribuição normal. Isso pode ser observado pelos valores de assimetria, de curtose e da significância do teste de Kolmogorov Smirnov.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.1 Medidas descritivas individualizadas das variáveis Mag (nT), CT (micro-Roentgen/hr), Th (ppm) e U (ppm).

Magnetometri					
Medidas	a	CT	K	Th	U
Mínimo	23401	2,93	0	0	0
Média	23832,8	23,6971	0,8956	0,5848	1,5595
Máximo	24383	63,43	2,69	3,23	8,98
Desvio padrão	61,33	8,9412	0,4489	0,3106	1,2052
Moda	23842	21,08	0,64	0,47	0
Assimetria	-0,18	1,06	1,15	1,28	1,60
Curtose	1,17	0,87	0,81	3,49	2,98
Coefficiente de variação	0,0026	0,3773	0,5013	0,5312	0,7728
Kolmog.Smirn ov	P<0,01	P<0,01	P<0,01	P<0,01	P<0,01

A tabela 4.2 apresenta as correlações entre as variáveis analisadas. Os resultados mostram que existe correlação positiva e significativa ($P<0,05$) entre as variáveis e indica ausência de relações inibitórias e/ou inversas entre as variáveis.

Tabela 4.2 Correlações entre as variáveis Mag (nT), CT (micro-Roentgen/hr), K (%) Th (ppm) e U (ppm).

Variáveis	Magnetometria	CT	K	Th	U
Magnetometria	1,00	0,17	0,13	0,11	0,15
CT	0,17	1,00	0,88	0,71	0,73
K	0,13	0,88	1,00	0,56	0,52
Tr	0,11	0,71	0,56	1,00	0,35
U	0,15	0,73	0,52	0,35	1,00

As cinco variáveis estudadas apresentaram níveis de ocorrências bastante distantes, com valores médios variando desde o valor médio da variável Th (0,5848 ppm), o de menor nível, até a média da variável Mag (23401 nT), quarenta mil vezes maior. Não só as médias de ocorrência das variáveis diferiram de forma acentuada, mas também suas variações de

ocorrência diferiram bastante; o coeficiente de variação da variável Mag (0,26%) é 297 vezes menor do que a variação da variável urânio. Esses fatos dificultam a análise e a interpretação conjunta das variáveis.

4.2 Estudo descritivo da variável magnetometria (Mag)

A variável Magnetometria tem um comportamento bastante homogêneo, apresentando o menor coeficiente de variação em relação às variáveis estudadas (0,26% de variação em torno da média (Tabela 4.1). Sua distribuição é levemente assimétrica à esquerda, o que é indicado pelo valor do coeficiente de assimetria levemente negativo, -0,18. Apresenta um perfil mesocúrtico, coeficiente de curtose 1,17 (Tabela 4.1). A distribuição de frequências da variável pode ser visualizada na figura 4.1.

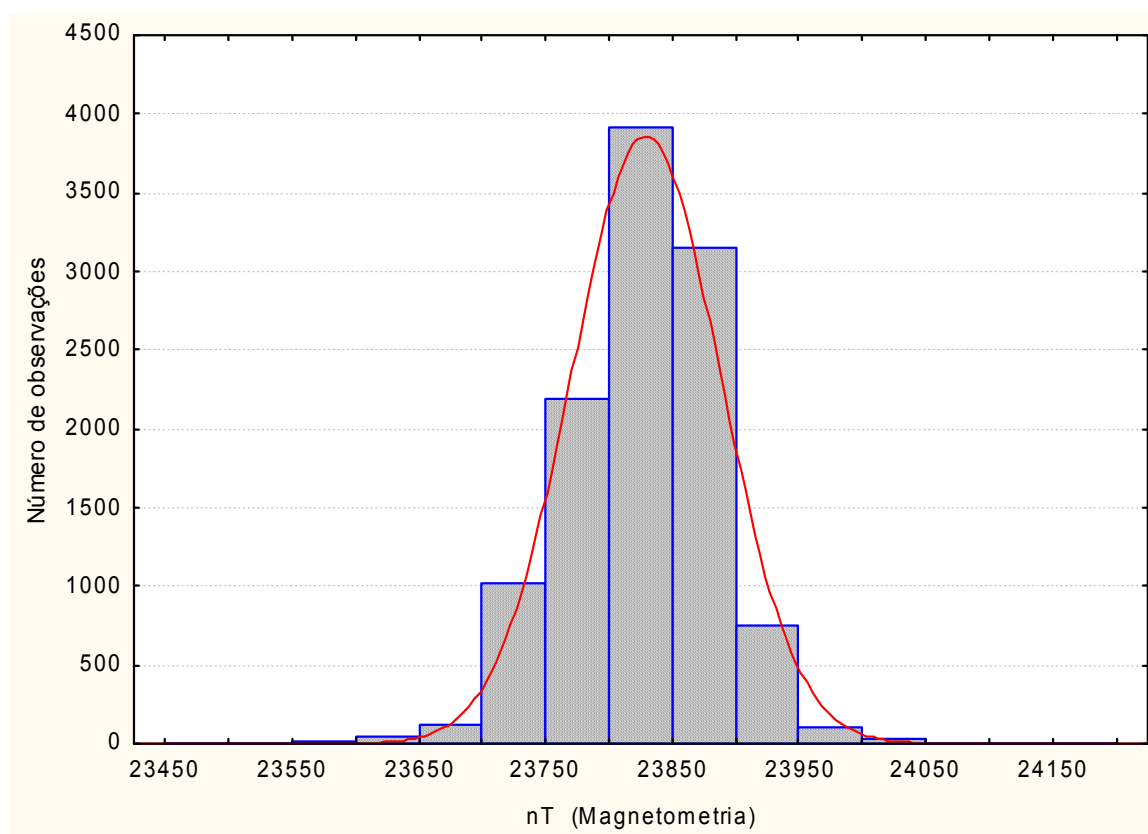


Figura 4.1 Histograma de frequência da variável magnetometria.

Como pode ser observado na figura 4.2, a variável magnetometria sofre variação em

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

função da posição geográfica em que a medida foi tomada. Essa variável distribuiu-se de forma não uniforme sobre a área em observação. O modelo polinomial que melhor ajustou a variação da Magnetometria em função das coordenadas de UTM foi o modelo quadrático $Mag = 3258417 - 0,1252.(UTM_O_L) - 1,6.10^{-9}(UTM_O_L)^2 - 0,9601(UTM_S_N) + 7,12.10^{-8}(UTM_S_N)^2 + 1,97.10^8(UTM_O_L.*UTM_S_N)$ que pode ser visualizado na figura 4.2.

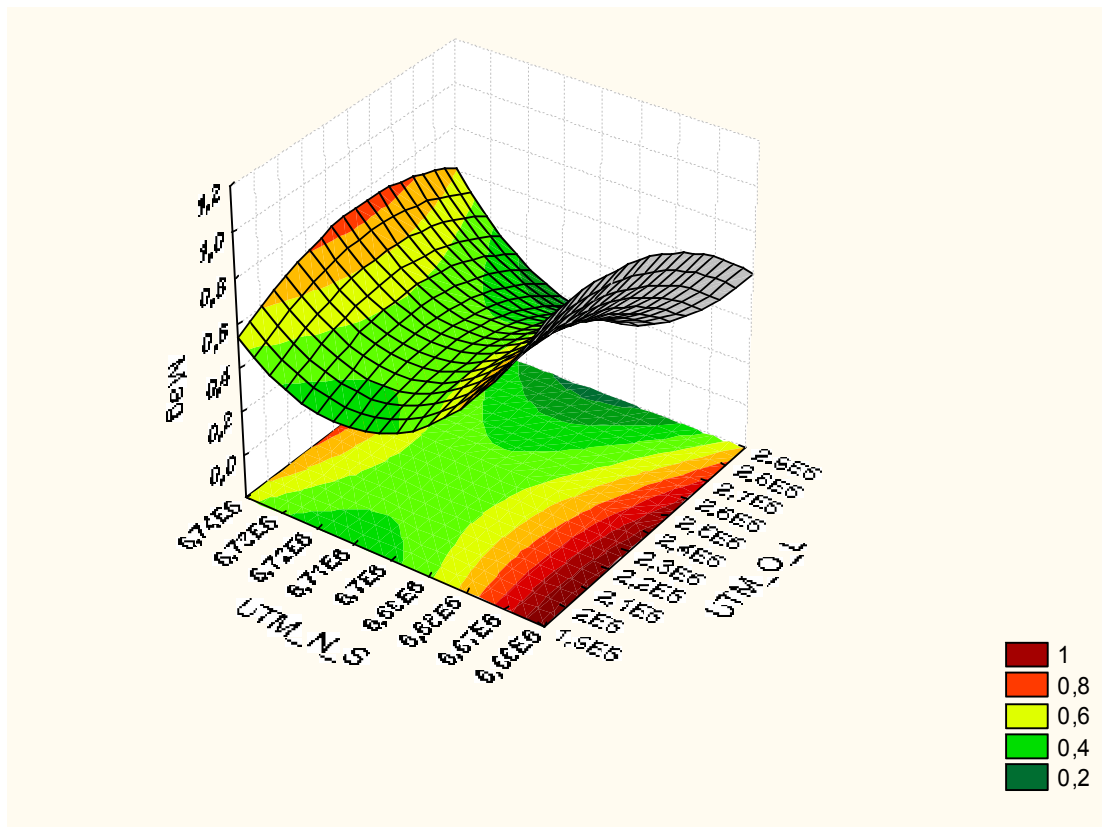


Figura 4.2 Comportamento espacial da variável magnetometria.

A relação de dependência da variável magnetometria em função das outras variáveis foi estimada através de um modelo de regressão múltiplo, em esquema *Step-wise* progressivo, e pode ser observada na tabela 4.3.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.3 Resumo da análise de regressão múltipla (*Step-wise*) da Mag (nT) em função de CT (micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm)

Variáveis	Coef. β_1	Correlação parcial	Coeficiente de deter.	Valor de t (25801)	Nível de significância
CT	0,316849	0,124678	0,847971	20,18418	0,000000
Potássio	-0,125398	-0,058302	0,790342	-9,38084	0,000000
Tório	-0,047772	-0,033555	0,522564	-5,39294	0,000000

Embora se tenha observado uma correlação positiva entre todas as variáveis, não foi possível detectar uma relação de dependência significativa entre as variáveis Magnetometria e teor de urânio, conforme tabela 4.3. A variável contagem total foi aquela que apresentou a relação mais estreita com a magnetometria.

Na tabela 4.3, após remover o efeito da CT sobre a variação da magnetometria, identificaram-se efeitos negativos das variáveis potássio (-0,058) e tório (-0,033). O efeito é inverso ao preliminarmente observado na Tabela 4.2.

A tabela 4.4 apresenta a média, desvio padrão e intervalo de confiança para média, estimados para variável magnetometria em cada uma das formações geológicas em estudo. Apesar de as diferenças entre as médias serem aparentemente pequenas, elas apresentam diferenças estatisticamente significativas ($P < 0,01$), como pode ser observado na tabela 4.5.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.4 Medidas descritivas da variável Mag (nT) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.

Formações Geológicas	Média nT	Desvio padrão	Limite inferior	Limite superior	n
Formação Rio do Rasto	23865,55	1,8378	23862,00	23869,10	939
Depósitos aluvionares atuais	23815,82	1,1201	23813,60	23818,00	2528
Grupo Rosário do Sul	23819,37	0,7087	23818,00	23820,80	6289
Zona urbana	23819,48	7,5104	23804,80	23834,20	56
Formação Serra Geral α_1	23847,85	2,2123	23843,50	23852,20	648
Formação Serra Geral β_1	23856,93	2,0702	23852,90	23861,00	740
Formação Botucatu	23864,50	4,5202	23855,70	23873,40	155
Geral	23841,36	28513	23835,79	23846,96	11355

Observa-se na tabela 4.4 que a média da Mag na Formação Rio do Rasto não apresenta diferença significativa, apenas no contraste com a média da Formação Botucatu. As médias dos depósitos aluvionares e Grupo Rosário do Sul não diferem da média da zona urbana; porém, diferem entre si. A média da Formação Serra Geral β_1 difere da média da Formação Botucatu. Esses resultados podem ser visualizados na tabela 4.5 e na figura 4.3.

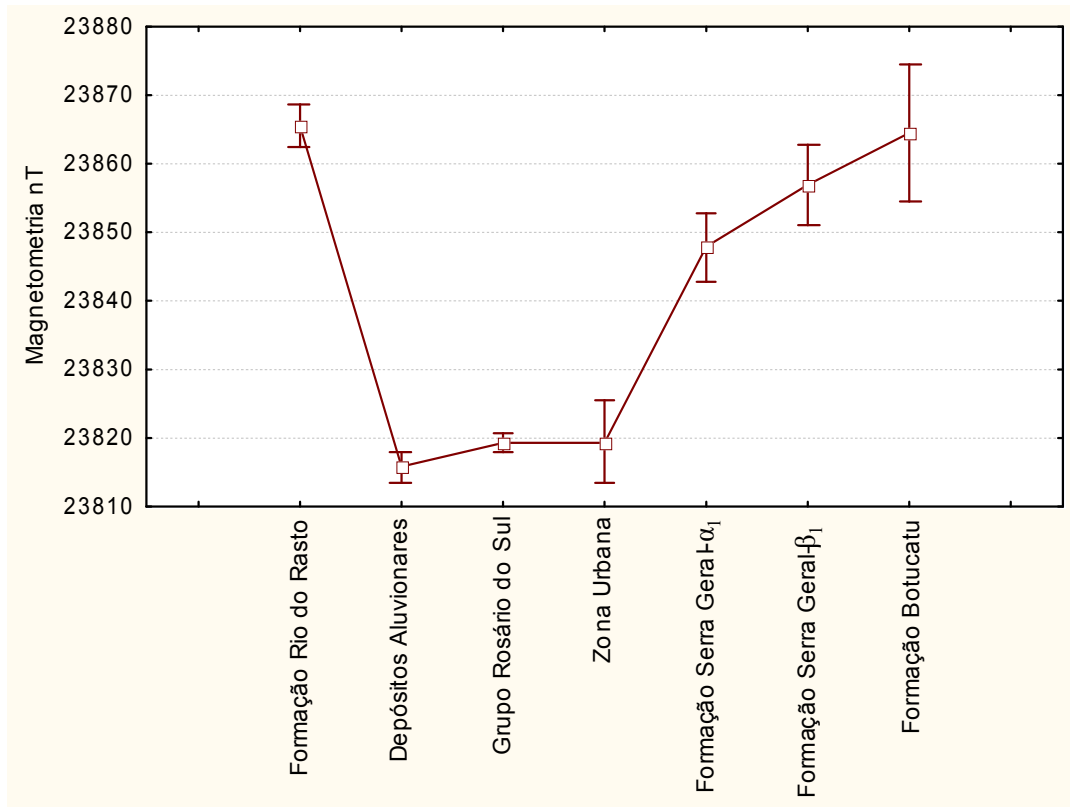
Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Figura 4.3 Dispersão das médias de contagem total para variável magnetometria.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.5 Comparação e significância entre as médias da variável Mag (nT) para as diferentes formações geológicas e zona urbana

Formações Geológicas	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Zona Urbana	Formação Serra Geral α_1	Formação Serra Geral β_1	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,00002	0,00002	0,000000	0,001806	0,001806	0,830154
Depósitos aluvionares atuais	0,000000		0,007347	0,629863	0,000000	0,000000	0,000000
Grupo Rosário do Sul	0,000000	0,007347		0,988292	0,000000	0,000000	0,000002
Zona urbana	0,000000	0,629863	0,988292		0,000002	0,000000	0,002703
Formação Serra Geral α_1	0,000000	0,000000	0,000291			0,042973	0,000000
Formação Serra Geral β_1	0,001806	0,000000	0,000002	0,002703	0,042973		0,126960
Formação Botucatu	0,830154	0,000000	0,000000	0,000925	0,126960	0,000000	

4.3 Estudo descritivo da variável contagem total (CT)

A variável contagem total possui uma alta variação em torno da média, quando comparada com a variação da variável magnetometria. Porém, em relação às demais variáveis, pode ser considerada uma variável com um comportamento homogêneo, apresentando 37,73%

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

de variação em torno da média (Tab.4.1). Sua distribuição é assimétrica positiva e levemente platicúrtica, como pode ser observado na figura 4.4, e por seus valores de assimetria 1,06 e curtose 0,87, respectivamente.

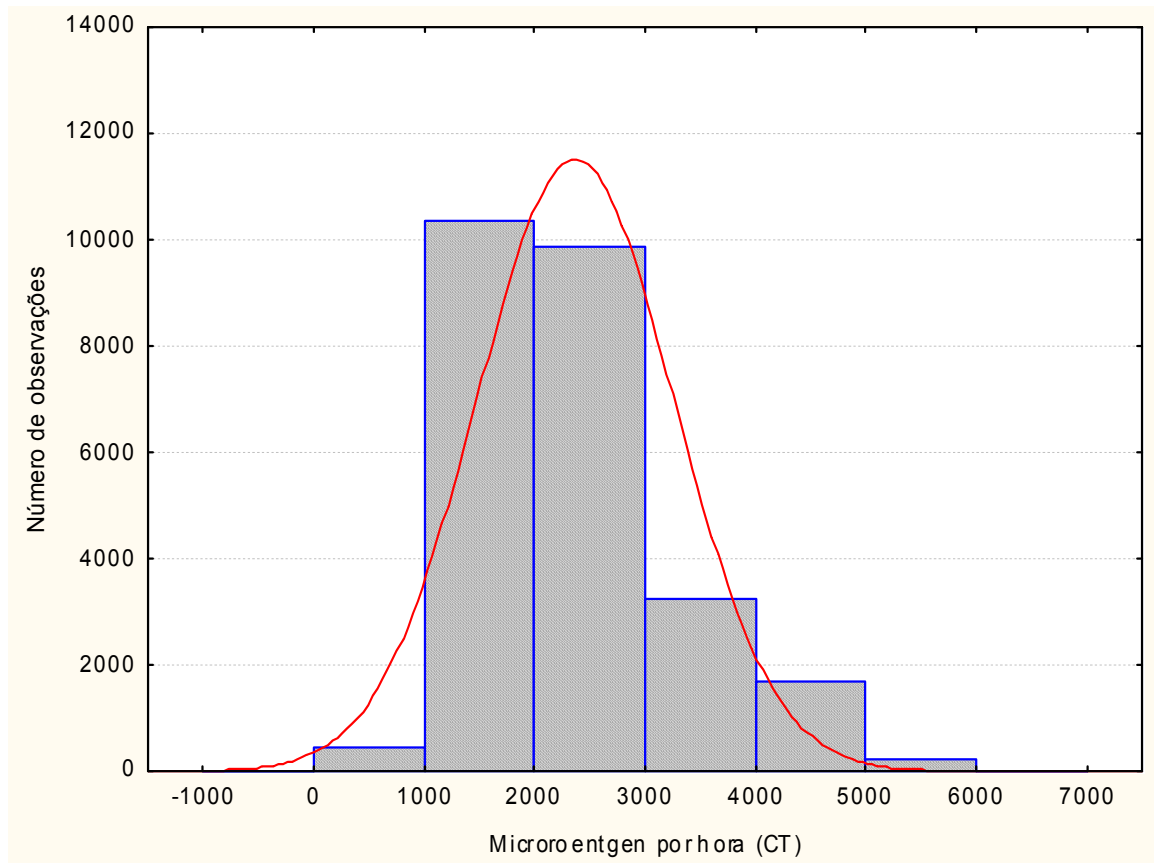


Figura 4.4 Histograma da distribuição da variável contagem total.

Quando analisada em relação às coordenadas geográficas, através de um modelo polinomial, a CT apresenta uma dependência espacial que foi melhor modelada através do modelo quadrático abaixo que pode ser visualizado na figura 4.5.

$$CT = 56796239,7446 - 2,0118.(UTM_O_L) - 2,85.10^{-7}(UTM_O_L)^2 - 16,9018.(UTM_S_N) + 1,2.10^{-6}(UTM_S_N)^2 + 3,2.10^{-7}.(UTM_O_L*UTM_S_N)$$

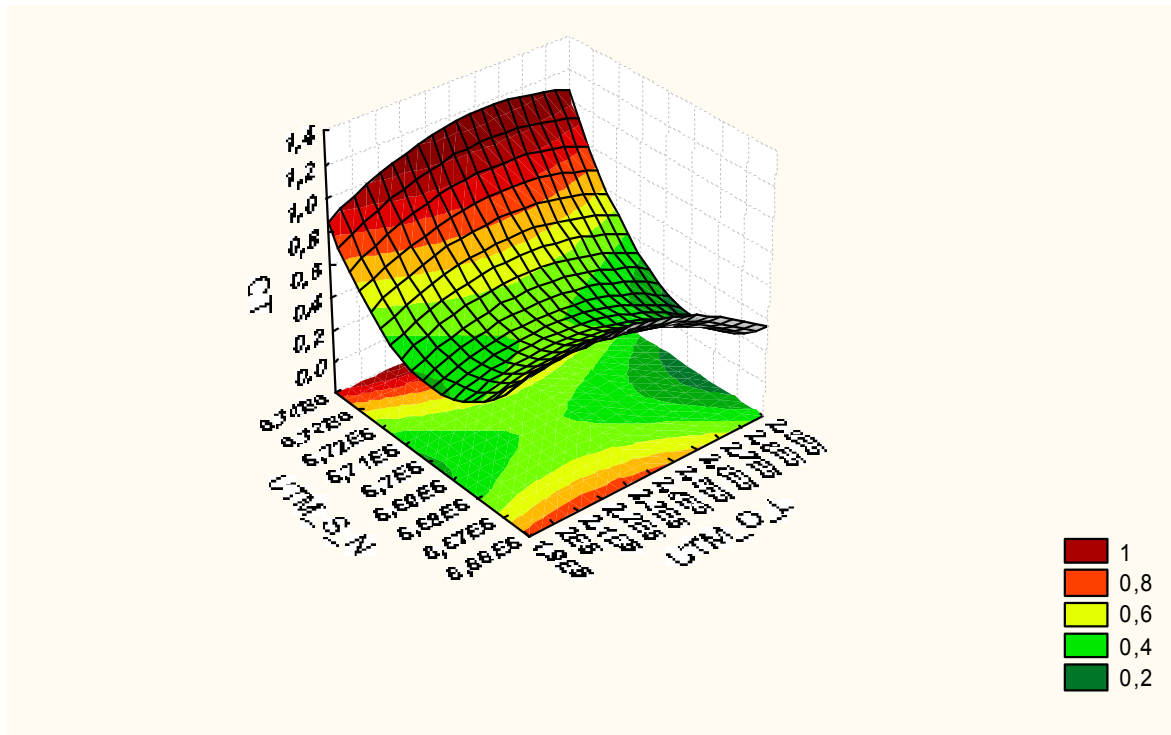


Figura 4.5 Comportamento espacial da variável contagem total.

A relação de dependência da variável CT em função das outras variáveis estimadas por meio do modelo de regressão múltiplo, em esquema *Step-wise* progressivo, pode ser observada na tabela 4.6.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.6 Resumo da análise de regressão múltipla (*Step-wise*) da variável contagem total em função de CT(micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm).

Variável	Ordem de entrada das variáveis	Coefficiente de Correlação múltipla	Coefficiente de deter. múltipla	Coefficiente de deter. ajustado	Valor F	Nível de signific.	Var. incluídas
Potássio	1	0,884007	0,781468	0,781468	92271,33	0,000000	1
Urânio	2	0,940756	0,885022	0,103554	23238,31	0,000000	2
Tório	3	0,968609	0,938204	0,053182	22204,26	0,000000	3
Mag	4	0,968790	0,938554	0,0003561	147,21	0,000000	4

Na tabela 4.6, observa-se que a variável que mais explica a variação da CT é a variável potássio, seguida das variáveis Urânio e Tório. O efeito da Magnetometria, apesar de estatisticamente significativo, é bastante reduzido (0,035%), para explicar a variação da CT.

A tabela 4.7 apresenta a média e o desvio padrão, estimados à variável CT, para cada uma das formações geológicas em estudo. O desvio extremo entre as médias varia do mínimo de 19,02 para a formação geológica Depósitos Aluvionares até um máximo de 3947 na Formação Serra Geral β_1 .

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.7 Medidas descritivas da variável CT (micro-Roentgen/hr) para as diferentes formações geológicas e zona urbana

Formações Geológicas	Média Microroentgen/h	Desvio padrão	Limite inferior	Limite superior	n
Formação Rio do Rasto	2013,00	17,50	1978,70	2047,31	939
Depósitos aluvionares atuais	1902,04	10,67	1881,14	1922,95	2528
Grupo Rosário do Sul	2018,27	6,76	2005,02	2031,53	6289
Zona urbana	2592,02	71,66	2451,55	2732,49	56
Formação Serra Geral α_1	3741,60	21,07	3700,31	3782,89	648
Formação Serra Geral β_1	3947,00	19,71	3908,36	3985,64	740
Formação Botucatu	3207,84	43,07	3123,41	3292,27	155
Geral	2774,54	27,21	2721,21	2827,87	11355

A tabela 4.8 mostra a comparação entre as médias para as diferentes formações. Observa-se que, com exceção das médias das formações Rio do Rasto e Grupo Rosário do Sul, todas as outras comparações diferem estatisticamente. Os valores para os níveis de significância das comparações entre médias podem ser observados na Tabela 4.8. A relação entre as médias pode ser visualizada na figura 4.6.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.8 Comparação e significância entre as médias da CT (micro-Roentgen/hr), para as diferentes formações geológicas e zona urbana.

Formações Geológicas	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Zona Urbana	Formação Serra Geral α_1	Formação Serra Geral β_1	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,000000	0,77883	0,00000	0,000000	0,000000	0,000000
Depósitos aluvionares atuais	0,00000		0,00000	0,00000	0,000000	0,000000	0,000000
Grupo Rosário do Sul	0,77883	0,000000		0,00000	0,000000	0,000000	0,000000
Zona urbana	0,00000	0,000000	0,000000		0,000000	0,000000	0,000000
Formação Serra Geral α_1	0,00000	0,000000	0,000000	0,00000		0,000000	0,000000
Formação Serra Geral β_1	0,00000	0,000000	0,000000	0,00000	0,000000		0,000000
Formação Botucatu	0,00000	0,000000	0,000000	0,00000	0,000000	0,000000	

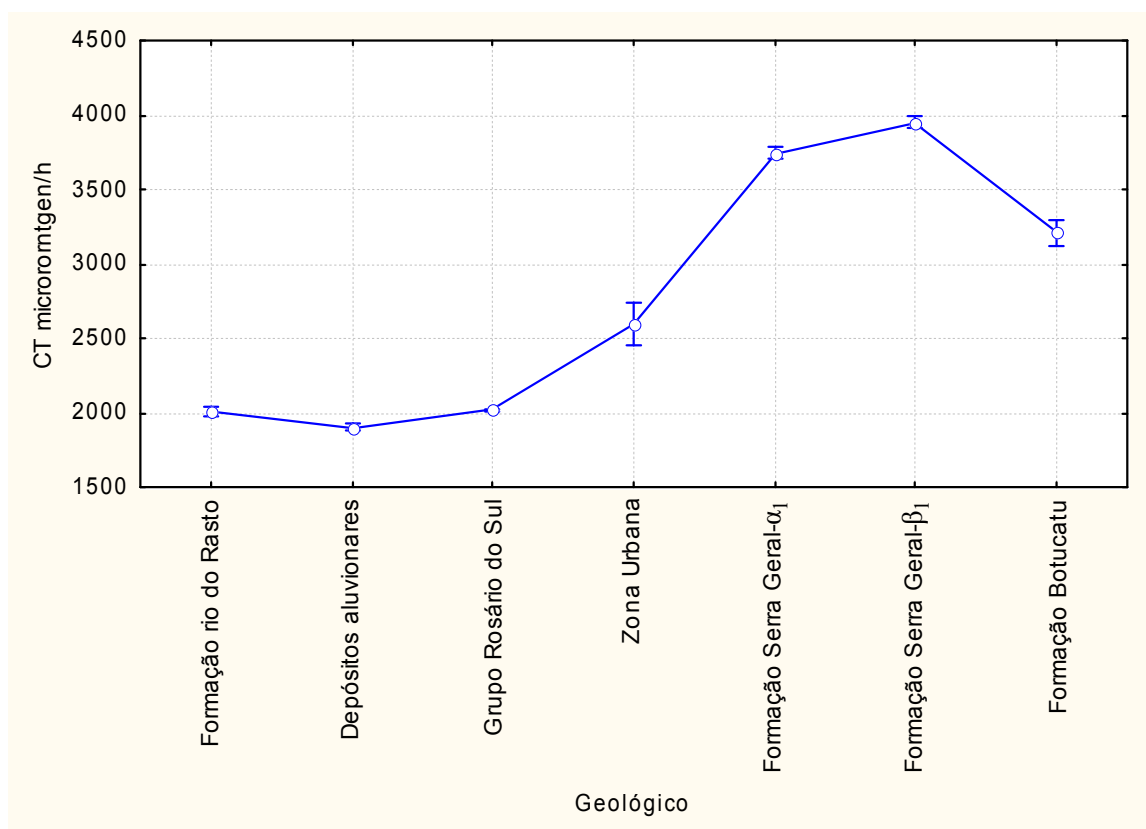


Figura 4.6 Dispersão das médias de contagem total para as diferentes formações geológicas e zona urbana.

4.4 Estudo descritivo da variável potássio (K)

A variável K, quando comparada com as demais variáveis em estudo, possui uma variabilidade superior àquelas encontradas nas variáveis Mag e CT e muito semelhante à variação do Tório, porém inferior à variação encontrada no urânio. A variável K possui um coeficiente de variação de 50,13% em torno do valor médio. A distribuição empírica da variável mostrou-se levemente assimétrica à direita, assimetria de 1,15 e levemente platicúrtica, curtose de 0,81 (Tabela 4.1), o que segue o padrão da variável CT conforme mostra a figura 4.7.

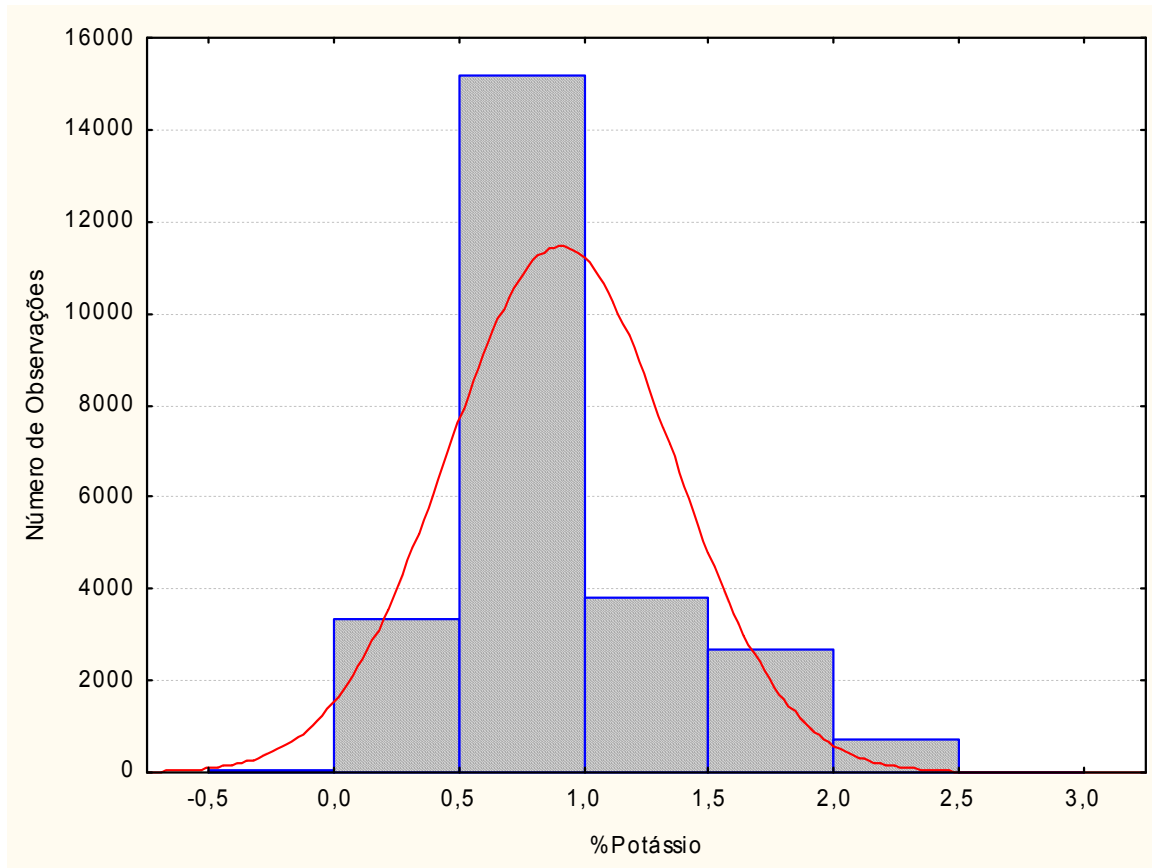


Figura 4.7 Histograma de frequência da variável potássio

Quando analisada em relação às coordenadas geográficas, através de um modelo polinomial, a variável K apresenta uma dependência espacial que foi melhor modelada através do modelo quadrático abaixo e que pode ser visualizada na figura 4.8.

$$K = 2902070,9871 - 0,06634.(UTM_L_O) - 1,5 \cdot 10^{-8} (UTM_L_O)^2 - 0,08649.(UTM_S_N) + 6,4 \cdot 10^{-9} (UTM_S_N)^2 + 1,0 \cdot 10^{-8} (UTM_L_O * UTM_S_N)$$

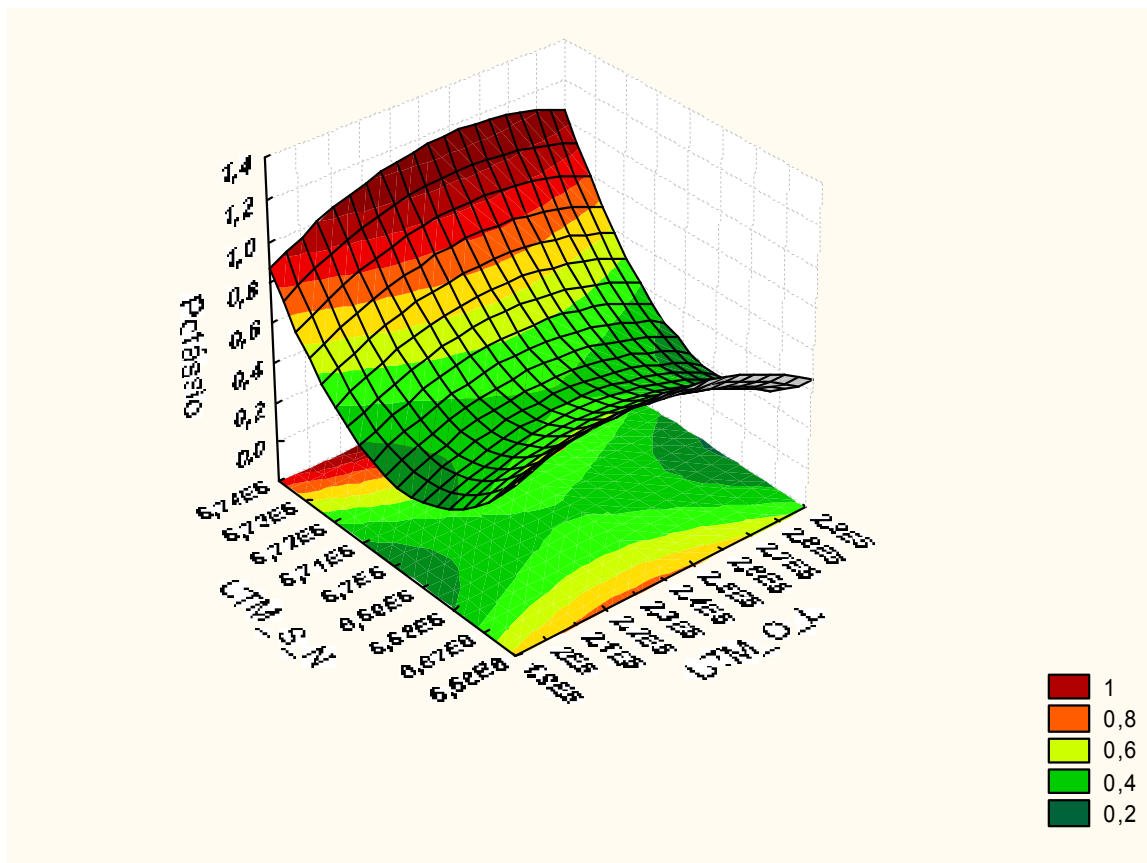


Figura 4.8 Comportamento espacial da variável potássio.

A média e o desvio padrão estimado para cada formação geológica são mostrados na tabela 4.9. As comparações entre essas médias encontram-se na tabela 4.10. Informa-se que essas tabelas e a (Figura 4.9) não foram representados em sequência estratigráfica. Essa análise evidencia que existe diferença significativa entre as médias da variável potássio para as diferentes formações geológicas, como função dos seus diferentes constituintes minerais, frações granulométricas, petrofabricas e estruturas. A exceção são as médias existentes para a Formação Rio do Rasto e o Grupo Rosário do Sul; nesse caso, não existe uma diferença significativa entre os valores para justificar uma separação das duas unidades sedimentares arenosas por meio da concentração da variável potássio.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.9 – Medidas descritas da variável K (%) para as formações geológicas da área de estudo.

Unidade Geológica	Teor médio de potássio %	Erro padrão da estimativa	Limite Inferior IC 95%	Limite Superior IC 95%	Tamanho da amostra
Formação Rio do Rasto	0,7113	0,00935	0,6929	0,7297	939
Depósitos aluvionares atuais	0,6723	0,00569	0,6611	0,6835	2528
Grupo Rosário do Sul	0,7075	0,00252	0,7026	0,7125	6289
Formação Serra Geral ($\alpha 1$)	1,7788	0,01195	1,7554	1,8023	648
Formação Serra Geral ($\beta 1$)	1,5757	0,01459	1,5471	1,6042	740
Formação Botucatu	1,1171	0,03658	1,0448	1,1894	155
Zona urbana	0,9421	0,03473	0,8725	1,0117	56
Geral	1,0721	0,01648	1,0395	1,1048	11355

Tabela 4.10 – Níveis de significância para as comparações entre as médias da variável K (%) das diferentes formações geológicas presentes na área de estudo.

Unidade Geológica	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Zona urbana	Formação Serra Geral	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,000069	0,671898	0,000000	0,00	0,00
Depósitos aluvionares atuais	0,000069		0,000000	0,000000	0,00	0,00
Grupo Rosário do Sul	0,671898	0,000000		0,000000	0,00	0,00
Zona urbana	0,000000	0,000000	0,000000		0,00	0,00
Formação Serra Geral ($\alpha 1$)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		0,00
Formação Serra Geral ($\beta 1$)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,00	
Formação Botucatu	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,00	0,00

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

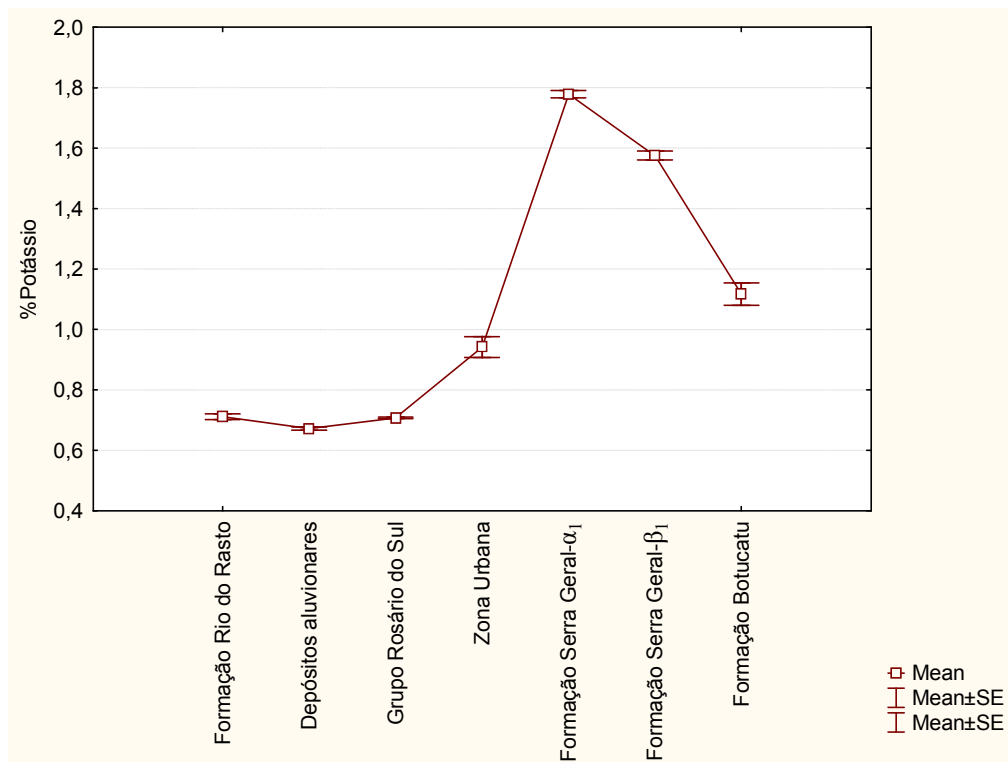


Figura 4.9 – Gráfico da dispersão das médias da variável potássio para as diferentes formações geológicas da área de estudo.

Na figura 4.9, pode-se observar que apenas as médias da Formação Rio do Rasto e do Grupo Rosário do Sul, constituídas de rochas sedimentares clásticas onde predominam os termos argilosos, não diferem entre si. As outras populações ou formações geológicas são estatisticamente diferentes ($P < 0,01$).

4.5 Estudo descritivo da variável tório (Th)

A variável tório apresenta um coeficiente de variação elevado (53,12%), semelhante à variabilidade da variável potássio, porém inferior à variação da variável urânio. Sua distribuição é assimétrica positiva, assimetria 1,28 e é levemente platicúrtica, curtose 3,49, seguindo o padrão das variáveis CT e K, como representado na figura 4.10.

Quando modelada em função de sua posição geográfica, a variável tório apresenta um comportamento significativamente dependente de sua posição geográfica. A função polinomial que melhor ajustou o comportamento da variável CT em função das coordenadas geográficas foi a quadrática abaixo.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

$$Th = 1266216,4749 - 0,01264.(UTM_O_L) - 1,1.10^{-8}.(UTM_O_L)^2 - 0,3780.(UTM_S_N) + 2,8.10^{-8}.(UTM_S_N)^2 + 2,6.10^{-9}.(UTM_O_L*UTM_S_N)$$

O comportamento espacial dessa variável pode ser visualizado na Figura 4.11.

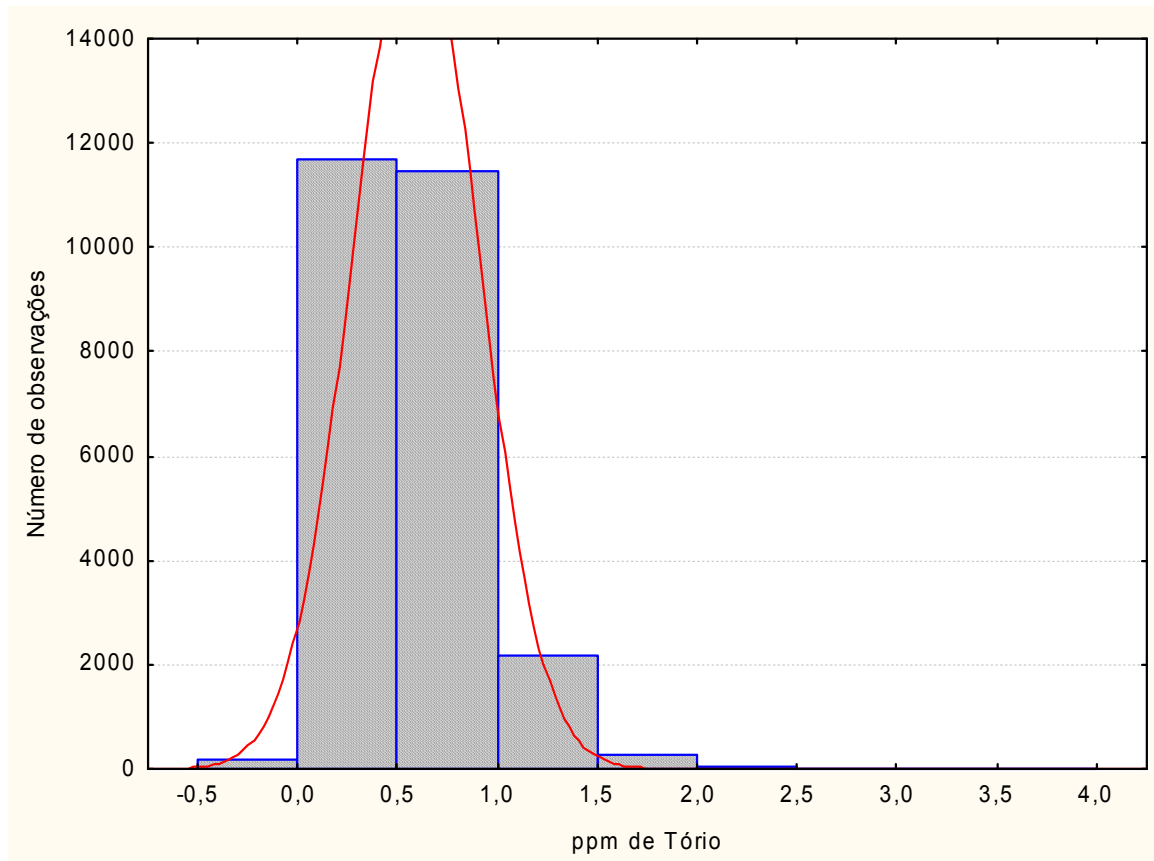


Figura 4.10 Histograma de frequência da variável tório.

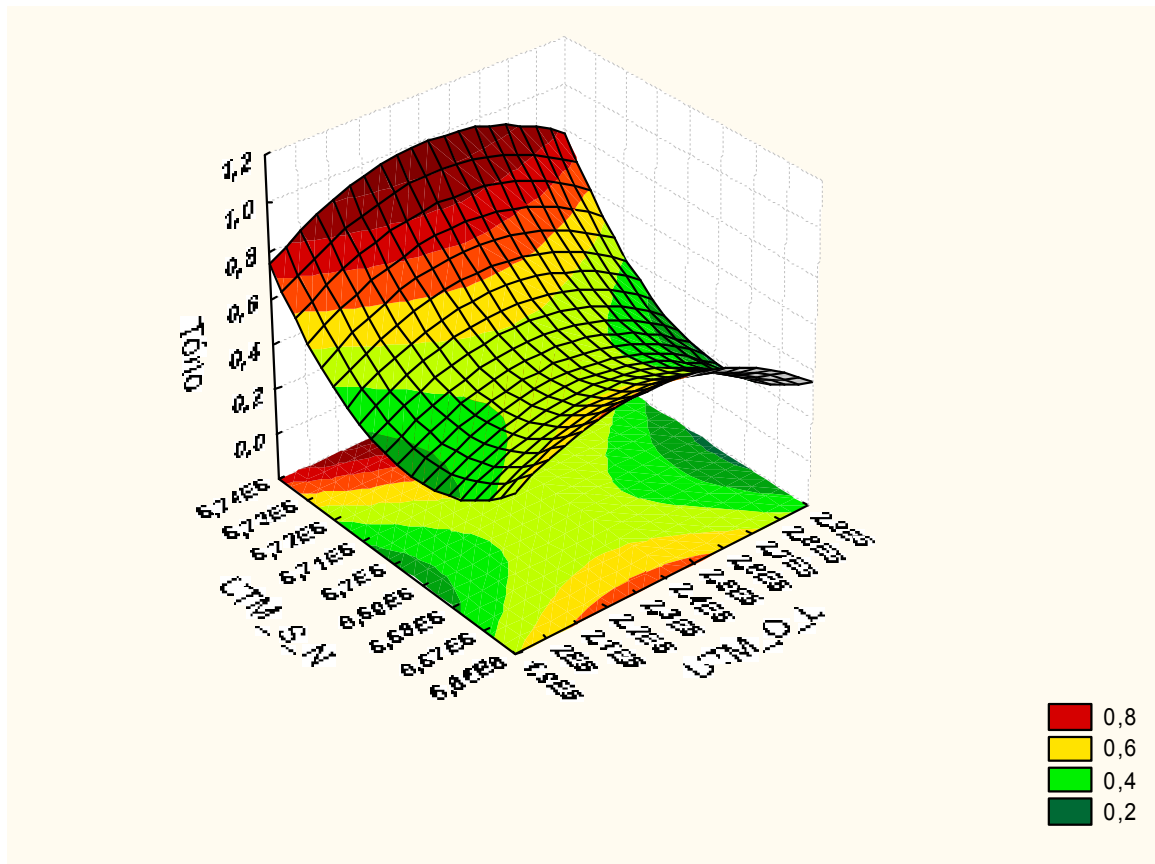


Figura 4.11 Comportamento espacial da variável tório.

Quando modelada em função do conjunto das outras variáveis, observa-se que a variável CT é a que mais explica a variação da variável tório (50%). A seguir as variáveis potássio (7%), e Urânio (6%) A variável magnetometria não apresentou influência significativa sobre a variável Tório. A tabela 4.11, apresenta os resultados de regressão múltipla em esquema *Step-wise*.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.11- Análise de regressão múltipla (*Step-wise*) da variável Th (ppm) em função de CT (micro-Roentgen/hr), K (%) e U (ppm).

Variável	Ordem de entrada das variáveis	Coefficiente de Correlação	Coefficiente de deter. múltipla	Coefficiente de deter. ajustado	Valor F	Nível de signific.	Variáveis incluídas
CT	1	0,708770	0,502355	0,502355	26047,24	0,000000	1
Urânio	2	0,750164	0,562747	0,060391	3563,66	0,000000	2
Potássio	3	0,796223	0,633972	0,071225	5020,58	0,000000	3

A média e o desvio padrão, estimados para cada uma das formações geológicas em estudo são apresentados na tabela 4.12 e na figura 4.12. As diferenças entre as médias das formações estão na tabela 4.13. Isso mostra que existe diferença significativa entre as médias da variável Tório com as formações ($P < 0,01$), exceto para as formações Depósitos Aluvionares e Grupo Rosário do Sul, que não apresentam diferença significativa entre as médias.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.12 Medidas descritivas da variável Th (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana

Formações Geológicas	Média	Desvio padrão	Limite inferior	Limite superior	n
Formação Rio do Rasto	0,507881	0,00797	0,49226	0,5235	939
Depósitos aluvionares atuais	0,450744	4856,74	0,44122	0,46026	2528
Grupo Rosário do Sul	0,508585	0,00308	0,50255	0,51462	6289
Zona urbana	1,06625	0,03263	1,00229	1,13021	56
Formação Serra Geral α_1	0,958981	0,00959	0,94018	0,97779	648
Formação Serra Geral β_1	0,931811	0,00898	0,91422	0,94941	740
Formação Botucatu	0,776774	0,01961	0,73833	0,81522	155
Geral	0,743004	693,8317	0,718721	0,767287	

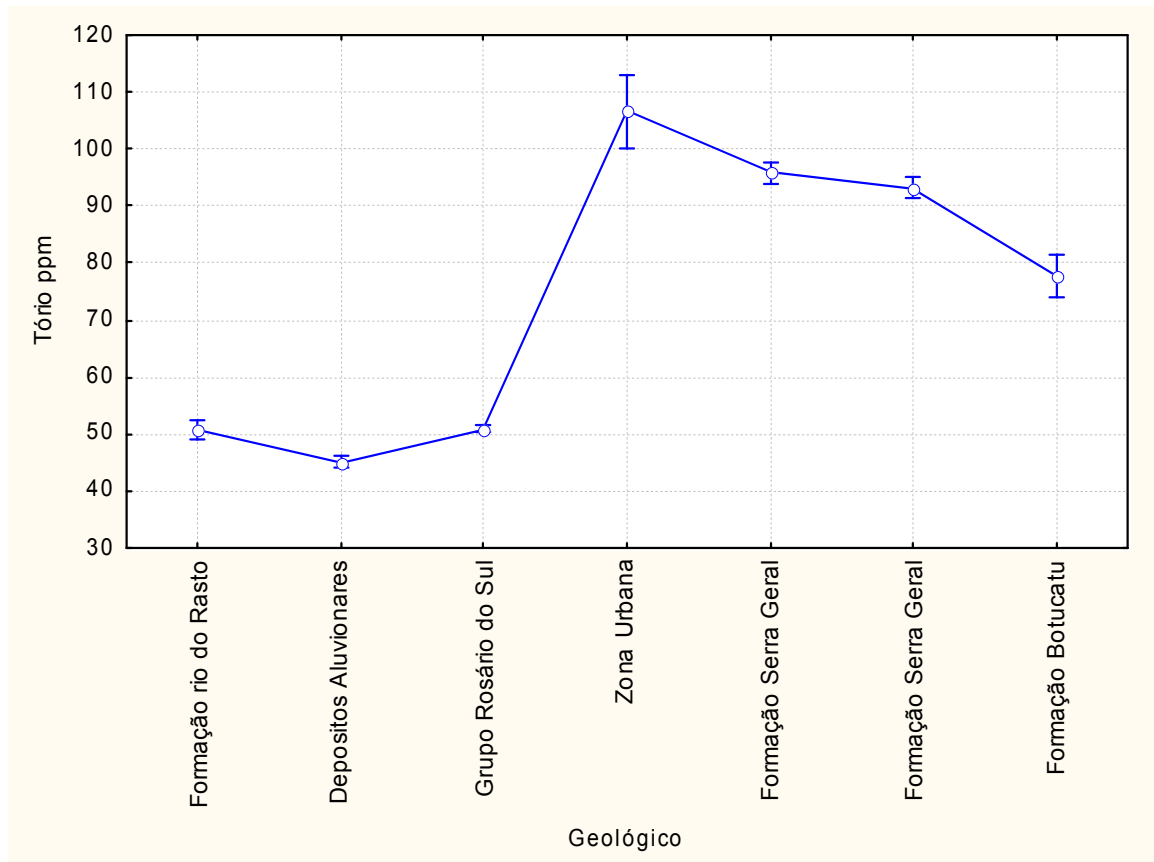
Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Figura 4.12 Dispersão das médias da variável tório (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.

4.6 Estudo descritivo da variável urânio (U)

A variável urânio foi a que apresentou maior grau de variabilidade entre as variáveis estudadas, com 77,28% de variação em torno do valor médio. Seu comportamento é semelhante ao das outras variáveis descritas anteriormente: leve assimetria à direita, assimetria 1,60 e platicúrtica, curtose 2,98 como se observa na figura 4.13.

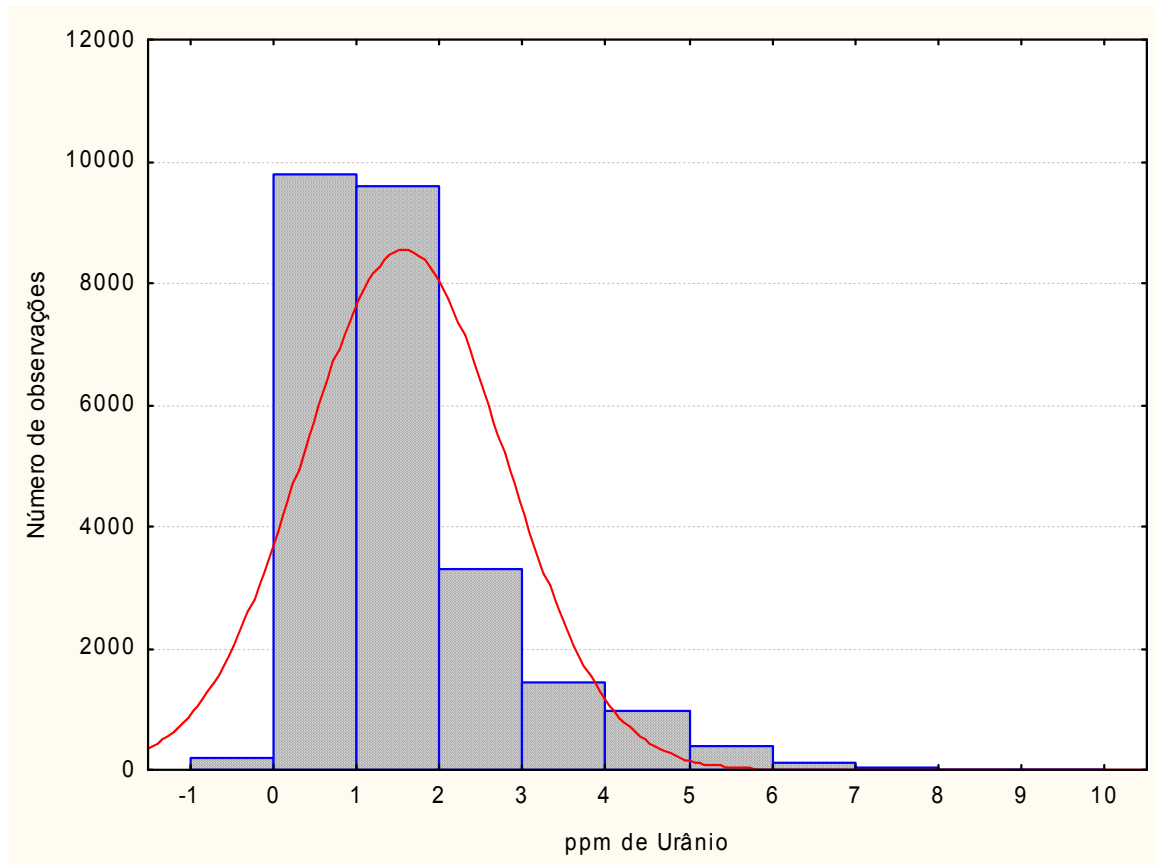


Figura 4.13 Histograma de frequência da variável urânio (ppm).

Quando modelada em função de sua posição geográfica, a variável urânio apresenta um comportamento significativamente dependente de sua posição geográfica. A função polinomial que melhor ajustou o comportamento da variável U em função das coordenadas geográficas foi a quadrática abaixo.

$$U = 3913085 - 0,3546.(UTM_O_L) - 2,9 \cdot 10^{-8} \cdot (UTM_O_L)^2 - 1,1581 \cdot (UTM_S_N) + 8,5 \cdot 10^{-8} \cdot (UTM_S_N)^2 + 5,5 \cdot 10^{-8} \cdot (UTM_O_L * UTM_S_N)$$

O comportamento espacial dessa variável pode ser visualizado na figura 4.14.

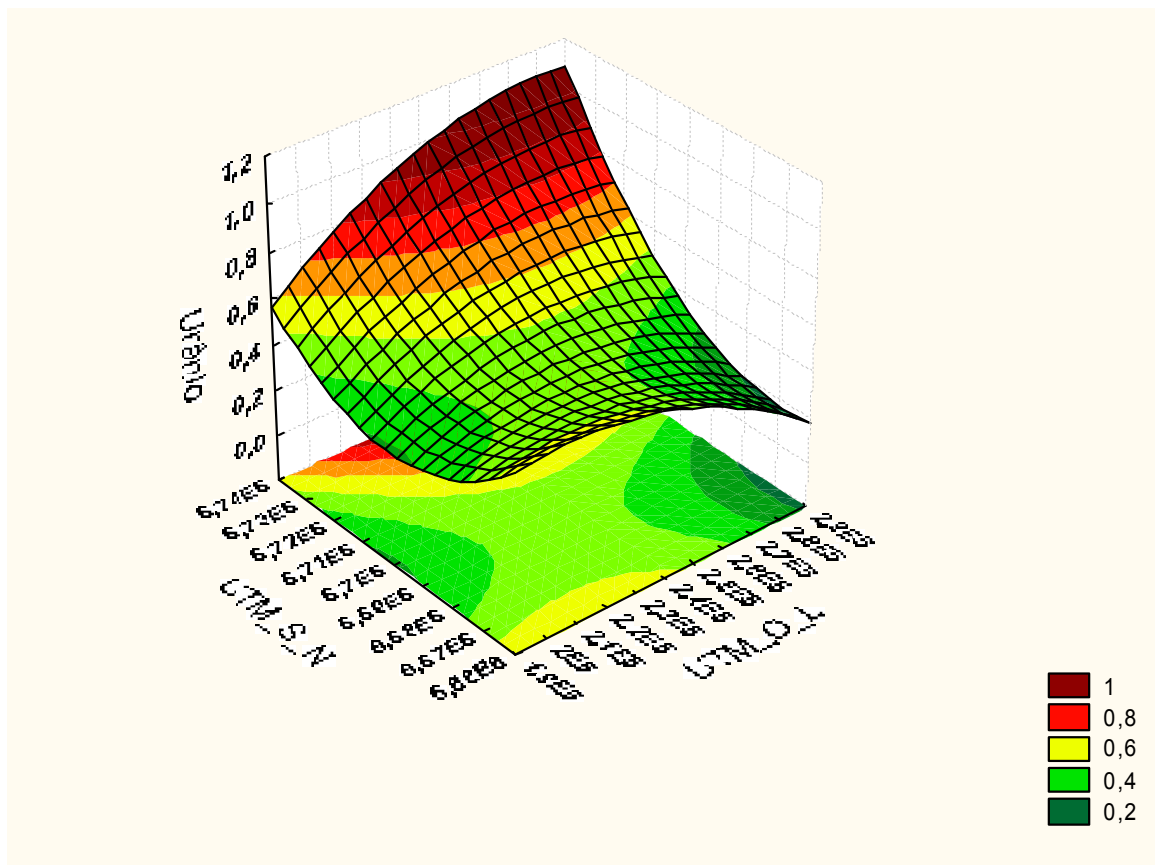


Figura 4.14 Comportamento espacial da variável urânio (ppm).

A variável urânio, quando modelada em função do conjunto das outras variáveis geofísicas através da análise de regressão múltipla (Step-wise), mostrou variabilidade dependente das variáveis CT, K e Th nessa ordem. Não apresentou, no entanto, relação com a variável Mag, conforme tabela 4.14.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.14 Análise de regressão múltipla (*Step-wise*) da variável U (ppm) em função de CT (micro-Roentgen/hr), K (%) e Th (ppm).

Variável	Ordem de entrada das variáveis	Coefficiente de Correlação	Coefficiente de deter. múltipla	Coefficiente de deter. ajustado	Valor F	Nível de signific.	Variáveis incluídas
CT	1	0,731377	0,534912	0,534912	29676,85	0,00	1
Potássio	2	0,783339	0,613620	0,078707	5255,99	0,00	2
Tório	3	0,838916	0,703780	0,090160	7853,03	0,00	3

As médias da variável urânio para cada uma das formações geológicas distintas estão apresentadas na tabela 4.15 e suas comparações com suas respectivas significâncias encontram-se na tabela 4.16. Observa-se que existem diferenças significativas entre as médias das diferentes formações geológicas, com exceção do contraste entre as médias das formações Depósitos Aluvionares e Grupo Rosário do Sul. Na figura 4.15, podem-se visualizar as relações das médias das diferentes formações geológicas.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.15 Medidas descritivas da variável U (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.

Formações Geológicas	Média	Desvio padrão	Limite inferior	Limite superior	n
Formação Rio do Rasto	0,948371	0,02739	0,89468	1,00206	939
Depósitos aluvionares atuais	1,202168	0,01669	1,16945	1,23489	2528
Grupo Rosário do Sul	1,186553	0,01058	1,16581	1,2073	6289
Zona urbana	2,36375	0,11215	2,14391	2,58359	56
Formação Serra Geral α_1	1,981142	0,03297	1,91652	2,04577	648
Formação Serra Geral β_1	3,758095	0,03085	3,69762	3,81857	740
Formação Botucatu	3,410387	0,06741	3,27825	3,54253	155
Geral	2,121495	0,042577	2,038034	2,204959	11355

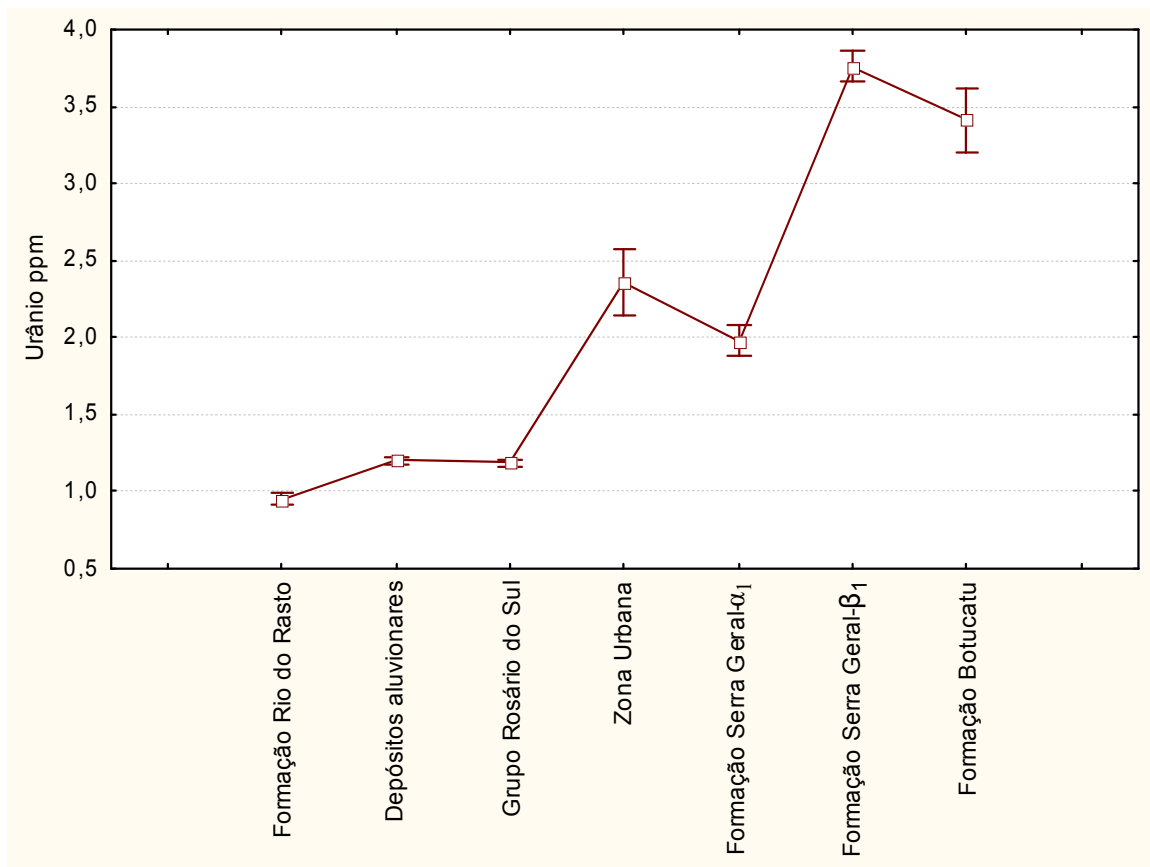


Figura 4.15 Dispersão das médias da variável urânio (ppm) para as diferentes formações geológicas e zona urbana.

4.7 Estudo descritivo das formações geológicas

A formação geológica Rio do Rasto foi a que apresentou o maior valor médio para a variável Mag (238,6555); em contrapartida, apresentou o menor valor médio para a variável U (0,9484) e valores baixos para as variáveis CT, K e Th, confirmando a hipótese de correlação positiva e significativa entre as três variáveis. Essa formação apresenta um comportamento bastante homogêneo para todas as variáveis. Os valores médios, os desvios padrões, os coeficientes de variação e os limites dessa formação encontram-se na tabela 4.17.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.17 Medidas descritivas da Formação Rio do Rasto

Variável	Média	Desvio padrão	CV	Li	Ls
Magnetometria	23865,55	1,83	7,69E-05	23861,95	23869,15
CT	2013,00	17,50	0,0086936	1978,61	2047,39
K	0,711342	0,0084	0,0117698	0,69489	0,727794
Th	0,507881	0,0080	0,0156906	0,492222	0,52354
U	0,948371	0,0274	0,0288795	0,894553	1,002189

A formação geológica Depósitos Aluviais Atuais é que apresentou as menores médias para as variáveis Mag, CT, K e U e a segunda menor média para a variável U, apenas superando a média da Formação Rio do Rasto. Os valores médios, os desvios padrões, os coeficientes de variação e os limites dessa formação encontram-se na tabela 4.18.

Tabela 4.18 Medidas descritivas da formação Depósitos Aluviais Atuais.

Variável	média	Desvio padrão	CV	Li	Ls
Magnetometria	23815,82	1,1178	4,69E-05	23813,62	23818,02
CT	1902,04	10,6700	0,005607502	1881,08	1923,00
K	0,672298	0,0051	0,007589819	0,662271	0,682325
Th	0,450744	0,0049	0,010774941	0,441201	0,460288
U	1,202168	0,0167	0,013884998	1,169368	1,234968

A formação Geológica Grupo Rosário do Sul possui valores médios para as variáveis CT, K, Th e U muito parecidos com os encontrados para Formação Rio do Rasto; porém, a variabilidade dessas variáveis é bem menor nessa formação. O Grupo Rosário do Sul apresenta o comportamento mais homogêneo das variáveis geofísicas dentre todas as estudadas. Os valores médios, os desvios padrões, os coeficientes de variação e os limites dessa formação encontram-se na tabela 4.19.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.19 Medidas descritivas da Formação Grupo Rosário do Sul.

Variável	média	Desvio padrão	CV	Li	Ls
Magnetometria	23819,37	7,0870	2,98E-05	23817,98	23820,76
CT	20,1827	6,7622	0,003350488	20,04982	20,31558
K	0,70754	0,0032	0,004572349	0,701183	0,713897
Th	0,508585	0,0031	0,006054524	0,502534	0,514636
U	1,186553	0,0106	0,008919113	1,165757	1,207349

As formações geológicas Serra Geral α_1 e β_1 apresentaram valores médios mais elevados em relação às variáveis CT, K, Th e U e valor médio inferior para Mag, quando comparadas com a Formação Rio do Rasto. Os valores médios, os desvios padrões, os coeficientes de variação e os limites dessa formação se encontram nas tabelas 4.20 e 4.21.

Tabela 4.20 Medidas descritivas da Formação Serra Geral α_1 .

Variável	Média	Desvio padrão	CV	Li	Ls
Magnetometria	23847,85	2,2078	9,26E-05	23843,51	23852,19
CT	3741,60	21,0664	0,005630323	3700,20	3782,99
K	1,778843	0,0101	0,005665739	1,759039	1,798647
Th	0,958981	0,0096	0,010003139	0,940131	0,977831
U	1,981142	0,03297	0,016641715	1,916357	2,045927

Tabela 4.21 Medidas descritivas da Formação Geológica Formação Serra Geral β_1 .

Variável	Média	Desvio padrão	CV	Li	Ls
Magnetometria	23856,93	2,0660	8,66E-05	23852,87	23860,99
CT	3947,00	19,7134	0,004994534	3908,26	3985,74
K	1,575662	0,0094	0,005985535	1,55713	1,594194
Th	0,931811	0,0090	0,009633627	0,914172	0,94945
U	3,758095	0,0308	0,008209505	3,697471	3,818719

A Formação Botucatu é um tipo de formação que apresenta comportamento de suas variáveis geológicas em um padrão intermediário entre as demais formações e a Formação Serra Geral. As medidas descritivas dos dados geofísicos, apresentadas na tabela 4.22,

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

indicam uma grande variabilidade entre os coeficientes de variação para as variáveis analisadas. A variável Magnetometria apresenta homogeneidade em todo o espectro dos dados observados com apenas 0,26% de variação em torno dos valores médios, indicando sua menor capacidade como fator discriminante. A variável Urânio apresenta a maior variabilidade (77,28%) em torno dos valores médios, tornando-a uma variável com melhor chance de contribuir para um processo de discriminação.

Tabela 4.22 Medidas descritivas da Formação Botucatu.

Variável	média	Desvio padrão	CV	Li	Ls
Magnetometria	23864,50	4,5143	0,000189163	23855,63	23873,37
CT	3207,84	43,0737	0,013427641	3123,20	3292,48
K	1,117097	0,02060705	0,018446966	1,076604	1,15759
Th	0,776774	0,01961408	0,025250691	0,738232	0,815316
U	3,410387	0,0674116	0,019766554	3,277923	3,542851

4.8 Estudo multivariado

O conjunto de variáveis de estado, quando submetido à análise de variância multivariada em função das formações geológicas, apresenta diferença estatisticamente significativa para a fonte de variação em estudo ($P < 0,0001$). Isso indica que existe um comportamento distinto do conjunto de variáveis dentro das diferentes formações geológicas.

Para melhor entender o comportamento conjunto das variáveis geofísicas dentro de cada Formação Geológica, foi necessário reduzir a dimensão do vetor resposta a um máximo de três dimensões; para tanto a técnica de análise fatorial foi aplicada.

A tabela 4.23 apresenta o resultado da Análise Fatorial de componentes principais e a tabela 4.24 o resultado da Análise Fatorial de componentes principais com a aplicação de uma rotação do tipo *Varimax*. Observa-se que é possível dividir as variáveis em dois componentes principais: um que envolve as variáveis Potássio, Tório, Urânio e Contagem Total e outro com a variável Magnetometria. A análise foi realizada por meio de uma matriz de correlação.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Porém, quando é aplicada uma rotação de eixos do tipo *Varimax*, é possível identificar 3 componentes. O primeiro, com carga alta nas variáveis Contagem Total, Potássio e Tório; o segundo, com carga na variável Magnetometria e o terceiro, somente com a variável Urânio.

Tabela 4.23 Resultado da análise fatorial de componentes principais

Variáveis	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
Magnetometria	-0,245688	0,964994	0,090502	-0,015013	-0,002681
Contagem Total	-0,981467	-0,069329	-0,029287	-0,066140	0,163351
Potássio	-0,880024	-0,103748	0,053349	-0,450924	-0,092820
Tório	-0,759689	-0,128030	0,535786	0,342612	-0,045076
Urânio	-0,757245	0,025778	-0,590919	0,270915	-0,057757

Tabela 4.24 Resultado da Análise Fatorial de Componentes Principais, aplicando uma rotação do tipo *Varimax*.

Variáveis	Factor1	Factor2	Factor3
Magnetometria	0,057258	0,995482	0,074190
CT	0,721167	0,081319	0,665016
Potássio	0,705832	0,040866	0,536827
Tório	0,932291	0,051493	0,093635
Urânio	0,175039	0,077917	0,941573

O resultado da Análise fatorial permite a redução de dimensão do problema multivariado de 5 para 3 dimensões sem perda significativa de informação.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

4.8.1 Estudo descritivo das variáveis transformadas com base nos fatores obtidos através da Análise Fatorial de componentes principais.

Cada ponto de observação original composta por valores de Mag, CT, K, Th e U através da Análise fatorial gerou um vetor de autovalores que são tomados como ocorrências das variáveis F_1 , F_2 e F_3 .

Tais observações geraram valores para as variáveis transformadas F_i que possuem suas medidas descritivas apresentadas na tabela 4.25.

Tabela 4.25 Medidas descritivas das Variáveis F_1 , F_2 e F_3 .

Variável	n	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Assimetria	Curtose
Fator1	25805	0,000000	3,15440	6,855201	1,000000	1,010340	1,368687
Fator2	25805	0,000000	7,09221	8,877199	1,000000	-0,224868	1,180431
Fator3	25805	0,000000	3,97875	6,606654	1,000000	1,277025	2,339314

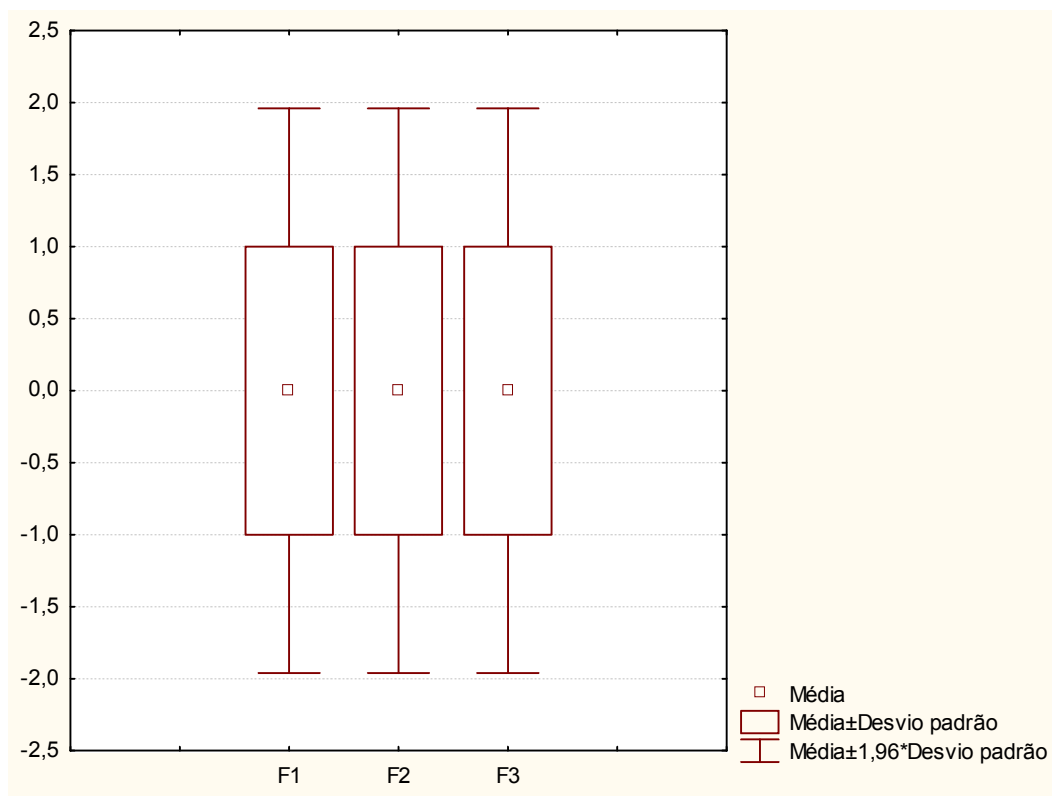


Figura 4.16 Medidas descritivas das variáveis F₁, F₂ e F₃.

Como se pode observar na tabela 4.25 e na figura 4.16, as variáveis transformadas, obtidas com base na análise fatorial, apresentam média zero e desvio padrão um, e, por definição, com correlações nulas, o que permite procedimentos mais robustos de comparação, além de permitir a construção de variável através de uma combinação linear das três variáveis, a qual não apresenta sobreposição de efeitos.

A variável raio(r) resultante da combinação das três variáveis F₁, F₂ e F₃ e definida como a distância do ponto definido pelo vetor $[f_{1i}; f_{2i}; f_{3i}]$ ao centro do espaço tridimensional gerado conjunto de valores de F_i, tem suas medidas descritivas relacionadas na tabela 4.26. e seu comportamento expresso nas figuras 4.17 e 4.18.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.26 Estatística descritiva da variável raio.

Discriminação	Valor
n	25805
Média	1,540449
Mínimo	0,032006
Máximo	9,032833
Desvio padrão	0,791786
Assimetria	1,384767
Curtose	3,503082

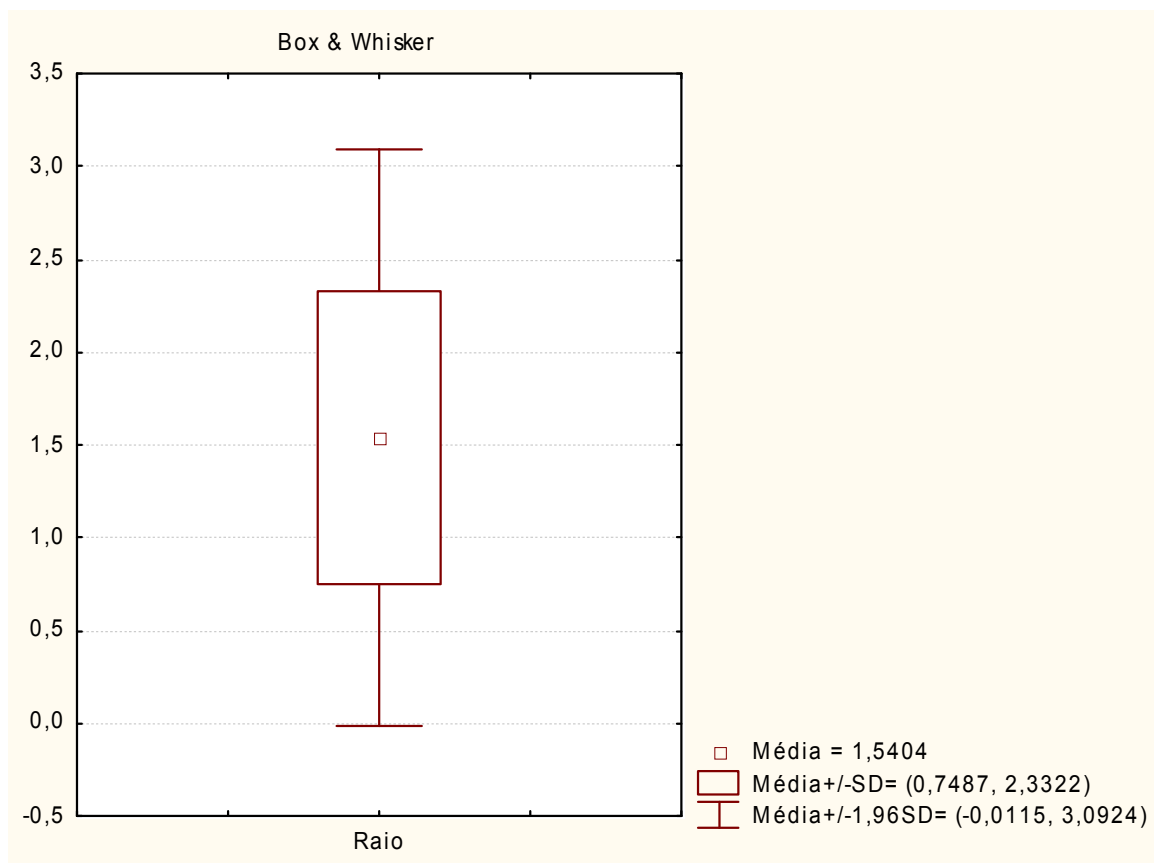


Figura 4.17 Gráfico de Box & Whisker da variável raio.

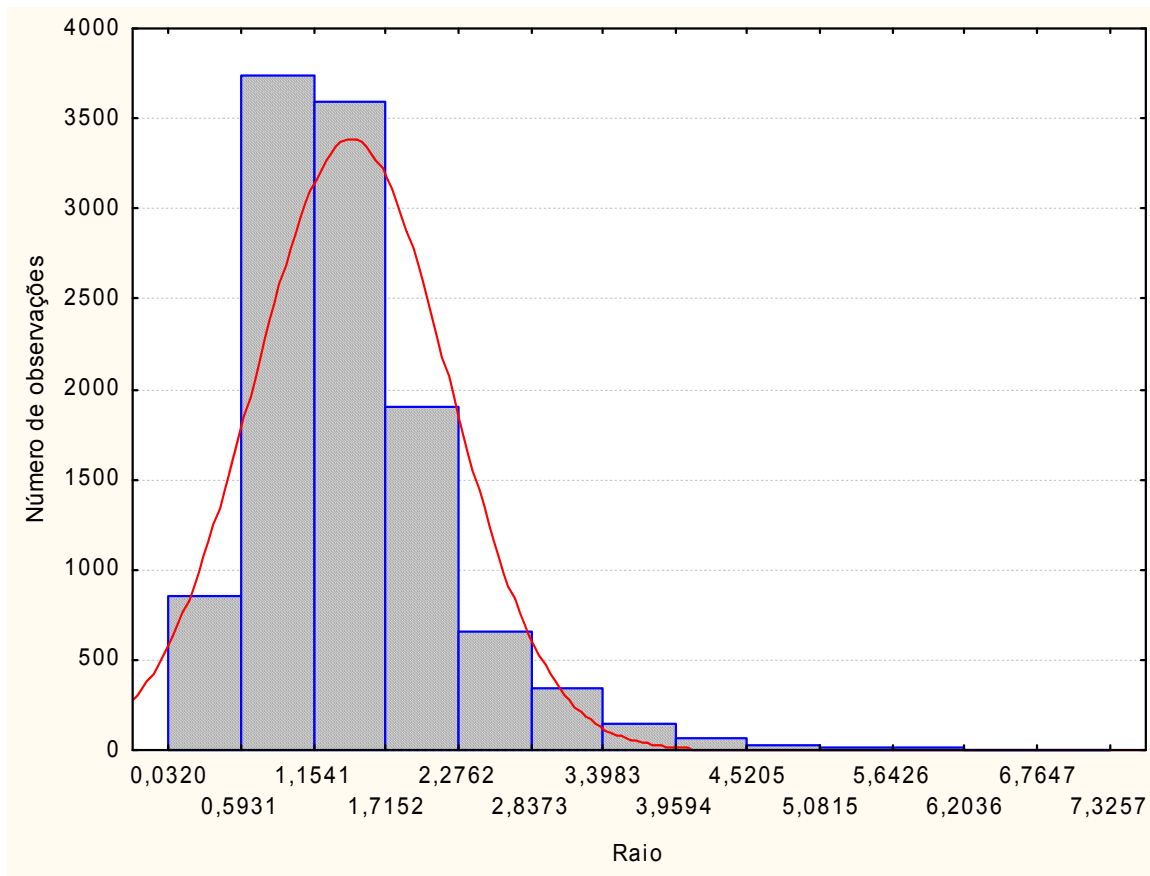


Figura 4.18 Histograma de frequência da variável raio.

4.8.2 Estudo comparativo das variáveis transformadas em função das formações geológicas.

As variáveis transformadas F1, F2, F3 e raio, que são representações padronizadas e agrupadas das variáveis originais, quando analisadas em função das formações geológicas, apresentam medidas descritivas com diferenças estatisticamente significativas, como pode ser observado nas tabelas de 4.27 a 4.36, bem como os comportamentos dessas diferenças podem ser visualizados nas figuras de 4.19 a 4.22.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.27 Medidas descritivas da variável F1 para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	Média	Erro padrão	Li-0,95	Ls+0,95	n
Formação Rio do Rasto	-0,214664	0,023690	-0,0261101	-0,168226	939
Depósitos aluvionares atuais	-0,460508	0,014438	-0,488810	-0,432207	2528
Grupo Rosário do Sul	-0,264901	0,009154	-0,282844	-0,246957	6289
Formação Serra Geral α_1	1,685927	0,028518	1,630027	1,741827	648
Formação Serra Geral β_1	0,941025	0,026686	0,888715	0,992235	740
Formação Botucatu	0,186839	0,058310	0,072543	0,301136	155
Geral	0,312286	0,026799	0,29892	0,364635	11299

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.28 Comparação entre as médias da variável F1 para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Formação Serra Geral α_1	Formação Serra Geral β_1	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,00	0,049642	0,000000	0,000000	0,000000
Depósitos aluvionares atuais	0,000000		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Grupo Rosário do Sul	0,049642	0,00		0,000000	0,000000	0,000000
Form.Serra Geral α_1	0,000000	0,00	0,000000		0,000000	0,000000
Form.Serra Geral β_1	0,000000	0,00	0,000000	0,000000		0,000000
Formação Botucatu	0,000000	0,00	0,000000	0,000000	0,000000	

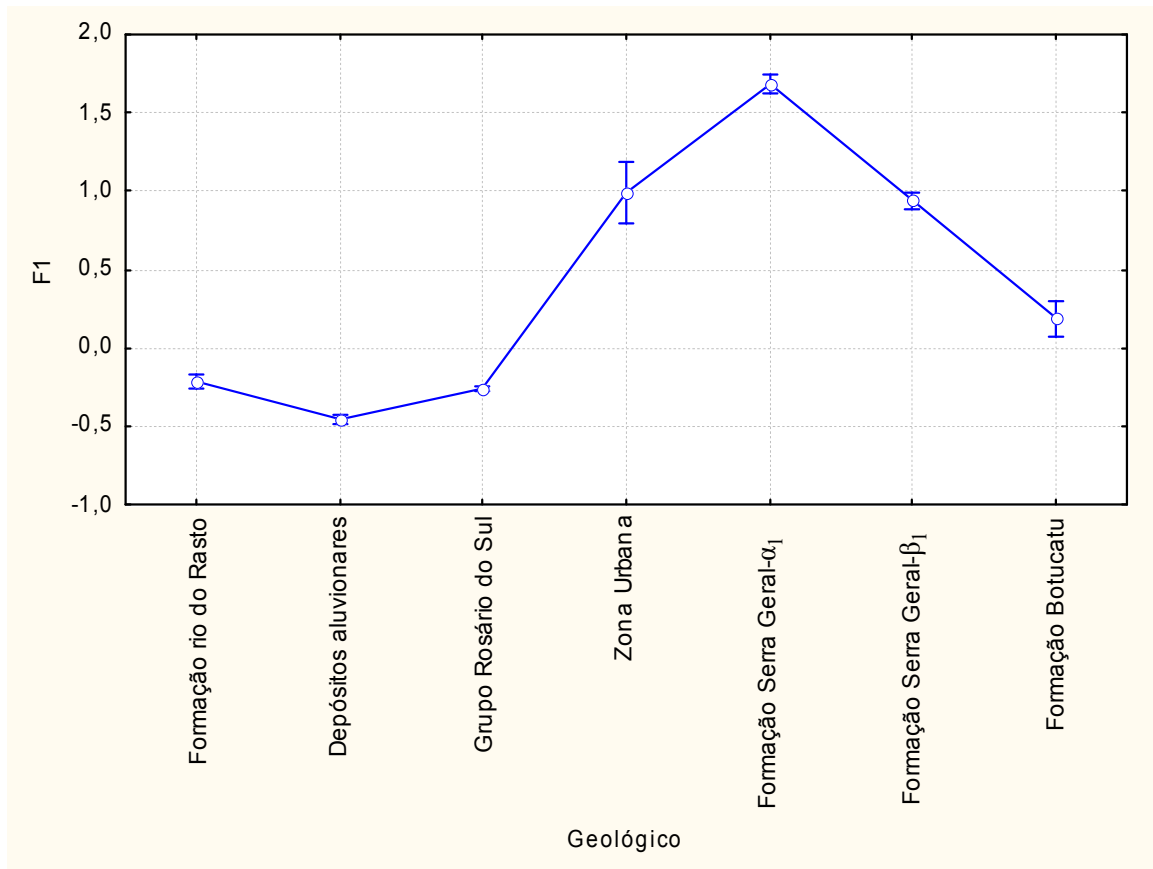
Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Figura 4.19 Dispersão das médias de F1 para as diferentes formações geológicas.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.29 Medidas descritivas da variável F2 para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	Média	Erro padrão	Li-0,95	Ls+0,95	N
Formação Rio do Rasto	0,586707	0,030248	0,527416	0,645998	939
Depósitos aluvionares atuais	-0,233183	0,018435	-0,269319	-0,197048	2528
Grupo Rosário do Sul	-0,181125	0,011688	-0,204035	-0,158215	6289
Formação Serra Geral α_1	0,101263	0,036411	0,029890	0,172636	648
Formação Serra Geral β_1	0,217438	0,034073	0,150649	0,284226	740
Formação Botucatu	0,422854	0,074449	0,276921	0,568788	155
Geral	0,152326	0,034217	0,085254	0,219398	11299

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.30 Comparação entre as médias da variável F2 para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Formação Serra Geral α_1	Formação Serra Geral β_1	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,041064
Depósitos aluvionares atuais	0,000000		0,016875	0,000000	0,000000	0,000000
Grupo Rosário do Sul	0,000000	0,016875		0,000000	0,000000	0,000000
Formação Serra Geral α_1	0,000000	0,000000	0,000000		0,019593	0,000102
Formação Serra Geral β_1	0,000000	0,000000	0,000000	0,019593		0,011953
Formação Botucatu	0,041064	0,000000	0,000000	0,000102	0,011953	

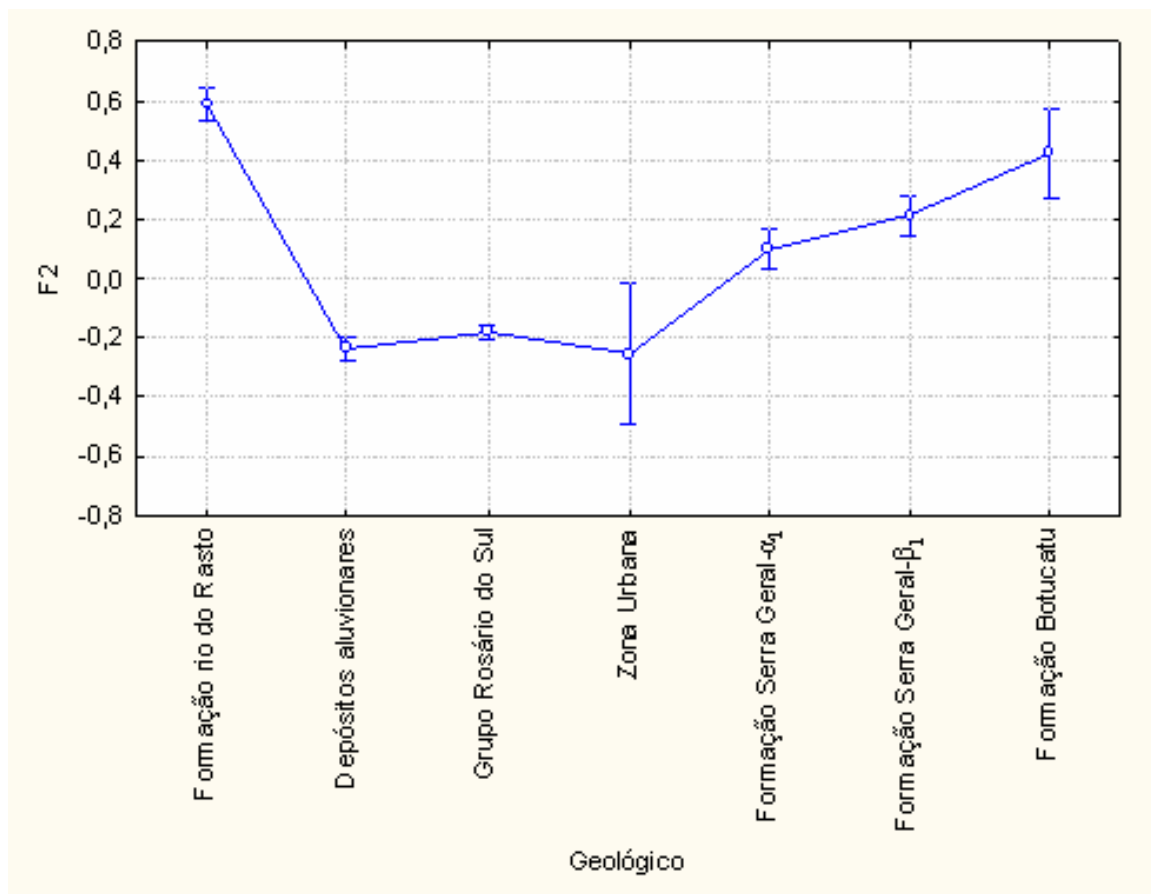
Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Figura 4.20 Dispersão das médias de F2 para as diferentes formações geológicas.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.31 Medidas descritivas da variável F3 para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	média	Erro padrão	Li-0,95	Ls+0,95	N
Formação Rio do Rasto	-0,515637	0,024654	-0,563964	-0,467311	938
Depósitos aluvionares atuais	-0,238088	0,015026	-0,267542	-0,208635	2528
Grupo Rosário do Sul	-0,294382	0,009527	-0,313055	-0,275708	6289
Formação Serra Geral α_1	0,388845	0,029678	0,330671	0,447020	648
Formação Serra Geral β_1	1,679154	0,027772	1,624715	1,733592	740
Formação Botucatu	1,303144	0,060682	1,184196	1,422092	155
Geral	0,387173	0,02789	0,332504	0,441842	11298

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.32 Comparação e significância entre as médias da variável F3 para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Formação Serra Geral α_1	Formação Serra Geral β_1	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,000000	0,000005	0,000000	0,000000	0,000000
Depósitos aluvionares atuais	0,000000		0,001602	0,000000	0,000000	0,000000
Grupo Rosário do Sul	0,000000	0,001602		0,000000	0,000000	0,000000
Formação Serra Geral α_1	0,000000	0,000000	0,000047		0,000000	0,000000
Formação Serra Geral β_1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000
Formação Botucatu	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	

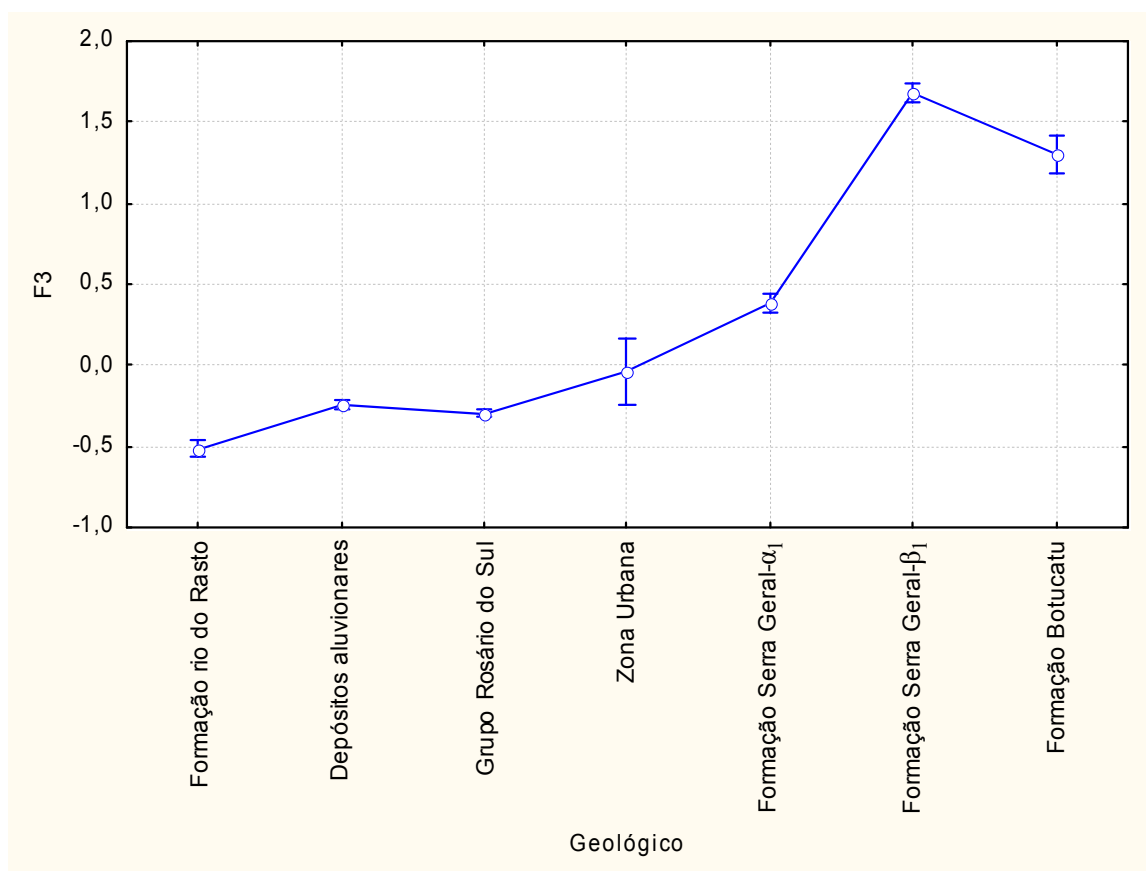
Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Figura 4.21 Gráfico da dispersão das médias de F3 para as diferentes formações geológicas.

As variáveis transformadas F_1 e F_3 discriminam as formações geológicas em dois grupos. O primeiro grupo é composto pelas formações Rio do Rasto, Depósitos Aluvionares e Grupo Rosário do Sul; apresentam valores negativos, ou seja, possuem valores médios abaixo da média das Variáveis F_1 , que concentra carga nas variáveis originais CT, K e Th, e F_3 , que concentra carga na variável original U. O segundo grupo é composto por as formações Serra Geral α_1 , Serra Geral β_1 e Botucatu que possuem valores positivos. A variável F_3 , que concentra carga na variável original magnetometria, apresenta resultados semelhantes às outras duas com diferença apenas para Formação Rio do Rasto que possui média superior a todas as outras. Tais conclusões podem ser visualizadas nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

Nas tabelas 4.29, 4.31 e 4.32, que apresentam os valores dos níveis de significância para as comparações entre as médias das formações geológicas, pode-se observar que todos os contrastes entre formações geológicas são significativos.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.33 Medidas descritivas da Variável Raio para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	média	Erro padrão	Li-0,95	Ls+0,95	N
Formação Rio do Rasto	1,3787	0,01996	1,3396	1,4178	939
Depósitos aluvionares atuais	1,3519	0,01216	1,328	1,3758	2528
Grupo Rosário do Sul	1,2248	0,0077	1,209	1,2399	6289
Formação Serra Geral α_1	2,3807	0,0240	2,334	2,4278	648
Formação Serra Geral β_1	2,6775	0,0023	2,634	2,7215	740
Formação Botucatu	2,1264	0,0491	2,030	2,2223	155
Geral	1,856667	0,019203	1,812433	1,90085	11299

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.34 Comparação entre as médias da Variável Raio para as diferentes formações geológicas.

Formações Geológicas	Formação Rio do Rasto	Depósitos aluvionares atuais	Grupo Rosário do Sul	Formação Serra Geral α_1	Formação Serra Geral β_1	Formação Botucatu
Formação Rio do Rasto		0,255923	0,000000	0,000000	0,00	0,000000
Depósitos aluvionares atuais	0,25592		0,000000	0,000000	0,00	0,000000
Grupo Rosário do Sul	0,00000	0,000000		0,000000	0,00	0,000000
Formação Serra Geral α_1	0,00003	0,000005	0,000000	0,000000	0,00	0,000038
Formação Serra Geral β_1	0,00000	0,000000	0,000000		0,00	0,000004
Formação Botucatu	0,00000	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000

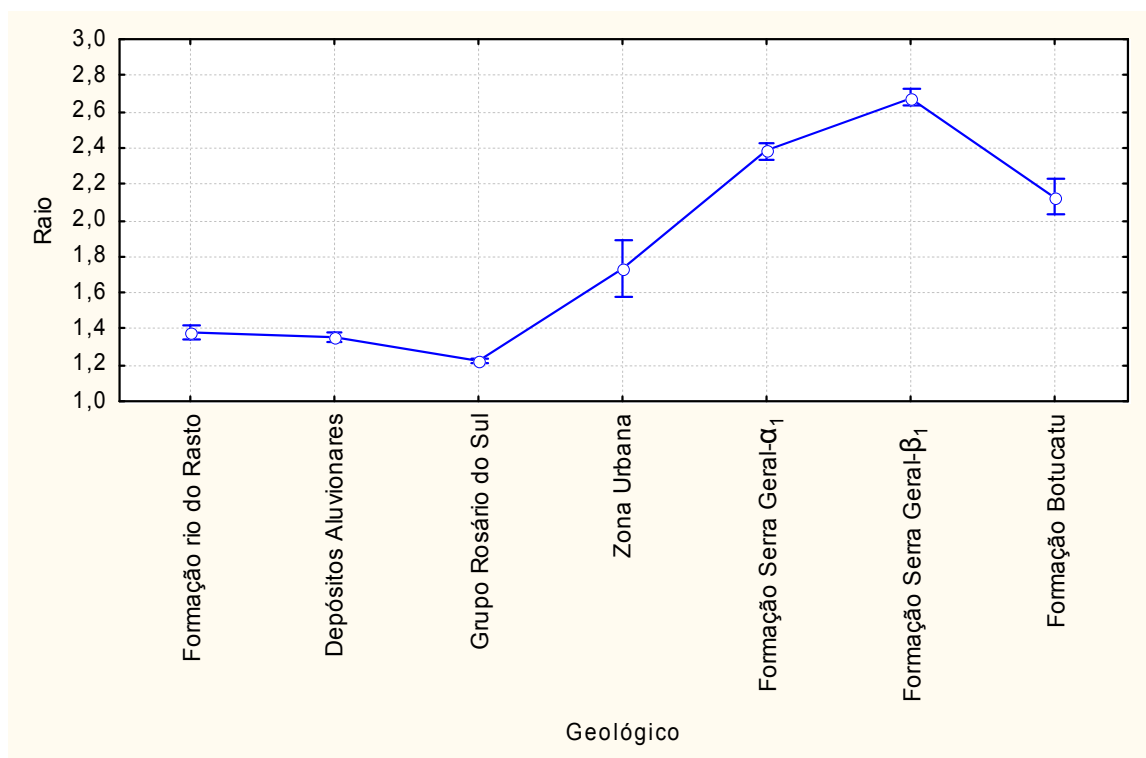


Figura 4.22 Gráfico da dispersão das médias de Raio para as diferentes formações geológicas.

4.9 Sistema de identificação de padrões

As medidas descritivas dos dados geofísicos, apresentadas na tabela 4.35, indicam uma grande discrepância de magnitude e variabilidade entre as cinco variáveis. O valor médio da variável magnetometria é mais de 40.000 vezes maior que o valor médio da variável tório.

Os coeficientes de variação para as cinco variáveis denotam uma heterogeneidade nos seus comportamentos. A variável magnetometria, que é a de maior magnitude, apresenta o menor coeficiente de variação 0,26% .

Em contrapartida, a variável Urânio, de valor médio intermediário, apresenta a maior variabilidade, 77,28% para o coeficiente de variação.

Tais discrepâncias dificultam uma análise comparativa das variáveis através de suas

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

unidades originais e, conseqüentemente, a construção de uma metodologia que classifique as observações segundo as ocorrências conjuntas das cinco variáveis avaliadas.

Para analisar o comportamento conjunto das variáveis, essas foram submetidas a uma análise de correlação. A tabela 4.36 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson para as variáveis tomadas duas a duas.

Tabela 4.35 – Medidas descritivas das variáveis Mag (ppm), CT (micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm).

Variáveis	média	mínimo	máximo	desvio padrão	Coef.Variação
Magnetometria	23832,83	23401,00	2438,00	61,33	0,0026
Contagem Total	2369,71	293,00	6443,00	894,12	0,3773
Potássio	89,56	0,00	269,00	44,89	0,5013
Tório	58,48	0,00	323,00	31,06	0,5311
Urânio	155,95	0,00	898,00	120,52	0,7728

Tabela 4.36 – Correlações entre as variáveis Mag (ppm), CT (micro-Roentgen/hr), K (%), Th (ppm) e U (ppm).

Variáveis	Magnetometria	Cont. Total	Potássio	Tório	Urânio
Magnetometria	1,00	0,17*	0,13*	0,11*	0,15*
Contagem Total	0,17*	1,00	0,88*	0,71*	0,73*
Potássio	0,13*	0,88*	1,00	0,56*	0,52*
Tório	0,11*	0,71*	0,56*	1,00	0,35*
Urânio	0,15*	0,73*	0,52*	0,35*	1,00

* Os valores de correlações grifados são significativos ($P < 0,0001$).

Como pode ser observado na tabela 4.36, existe correlação positiva e significativa entre todas as variáveis. Porém, quando analisadas de forma mais apurada através de análise de correlação e regressão múltiplas, as variáveis apresentam um comportamento de variação conjunta diferenciado daquele que é apresentado quando analisadas aos pares.

A tabela 4.37 apresenta os valores dos coeficientes de correlação parciais e os

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

coeficientes de regressão Step-wise progressiva para cada variável em função do conjunto das variáveis restantes.

Tabela 4.37 - Correlações parciais e coeficientes de regressão múltipla (*Step-wise*).

Variáveis		Magnetom.	CT	K	Th	U
Magnetom.	Coeficientes		0,3168	-0,1254	-0,0478	
	Correl.parc.		0,1247	-0,0583	-0,0336	
CT	Coeficientes	0,0190		0,5453	0,2787	0,3497
	Correl.parc.	0,0753		0,8566	0,6799	0,7678
K	Coeficientes	-0,0184	1,3457		-0,2603	-0,3747
	Correl.parc.	-0,0466	0,8566		-0,4043	-0,5237
Th	Coeficientes	-0,0163	1,6589	-0,6278		-0,5364
	Correl.parc.	-0,0265	0,6799	-0,4043		-0,4827
U	Coeficientes		1,6867	-0,7323	-0,4346	
	Correl.parc.		0,7704	-0,5245	-0,4831	

Como pode ser observado na tabela 4.37, a variável Magnetometria não possui correlação significativa com a variável Urânio. Porém possui correlação significativa direta com a variável contagem total e correlação significativa inversa com as variáveis Potássio e Tório. A variável contagem total encontra-se correlacionada com todas as variáveis, de forma direta, com grau de explicação decrescente na ordem Potássio, Urânio, Tório e magnetometria. A variável Potássio apresenta correlação significativa com todas as variáveis, sendo de forma direta com a variável contagem total e inversa, com grau de explicação decrescente, com as variáveis Urânio, Tório e magnetometria. As variáveis Tório e Urânio possuem o mesmo comportamento da variável Potássio, com correlações significativas positivas com a variável contagem total e inversa com as outras variáveis.

A análise fatorial aplicada ao conjunto de variáveis padronizadas gerou um conjunto de autovalores, dos quais foram selecionados os três primeiros, o que pode ser constatado na tabela 4.38, onde se verificam 91,21% da variação total dos dados. Com os autovalores dessa tabela foram geradas as cargas para cada uma das variáveis, que são apresentadas na tabela 4.39, cargas sem rotação, e na tabela 4.40, cargas após uma rotação do tipo Varimax.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Tabela 4.38 – Medidas descritivas dos três primeiros Autovalores gerados pela análise fatorial.

valores	Autovalores	%total da variação	Autovalores cumulativos	% cumulativa
1	2,948629	58,97258	2,948629	58,97
2	0,963841	19,27681	3,912469	78,25
3	0,649147	12,96294	4,560616	91,21

A tabela 4.24 mostra que o Fator 1 carrega suas cargas sobre as variáveis Contagem Total, Potássio e Tório. O Fator 2 reproduz 99,55% da variação da variável Magnetometria, e Fator F 3 reproduz 94,16% da variabilidade da variável Urânio. Com os valores de cargas dos três fatores, foram gerados os escores padronizados que serão tomados como variáveis transformadas que representarão as variáveis originais. Os valores das medidas descritivas dos escores são apresentados na tabela 4.25, e a matriz de correlações na tabela 4.39.

Tabela 4.39 - Correlação entre os escores dos fatores

Variáveis	f_1	f_2	f_3
f_1	1,000	0,000	0,000
f_2	0,000	1,000	0,000
f_3	0,000	0,000	1,000

As novas variáveis, como pode ser observado nas tabelas acima, são independentes, ortogonais e identicamente distribuídas. Quando submetidas à metodologia de identificação de padrões, apresentaram os resultados constantes na tabela 4.40.

Tabela 4.40 - Valor dos centróides e número de observações para subespaço de classificação

Centróides	Subespaços					
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
\bar{y}_1	-0,326	-0,417	-0,228	1,838	0,917	-0,420
\bar{y}_2	-1,204	0,035	1,018	-0,069	0,203	0,181
\bar{y}_3	-0,264	-0,630	-0,426	-0,109	1,811	0,362
n_i	5338	5169	4929	2917	2440	5012

Cada observação y_i , após classificada como pertencente a um dos subespaços, em função de sua proximidade com o centróide do subespaço e georeferenciada em função das observações originais, foi mapeada, procedimento que gerou o infográfico (Figura 4.23).

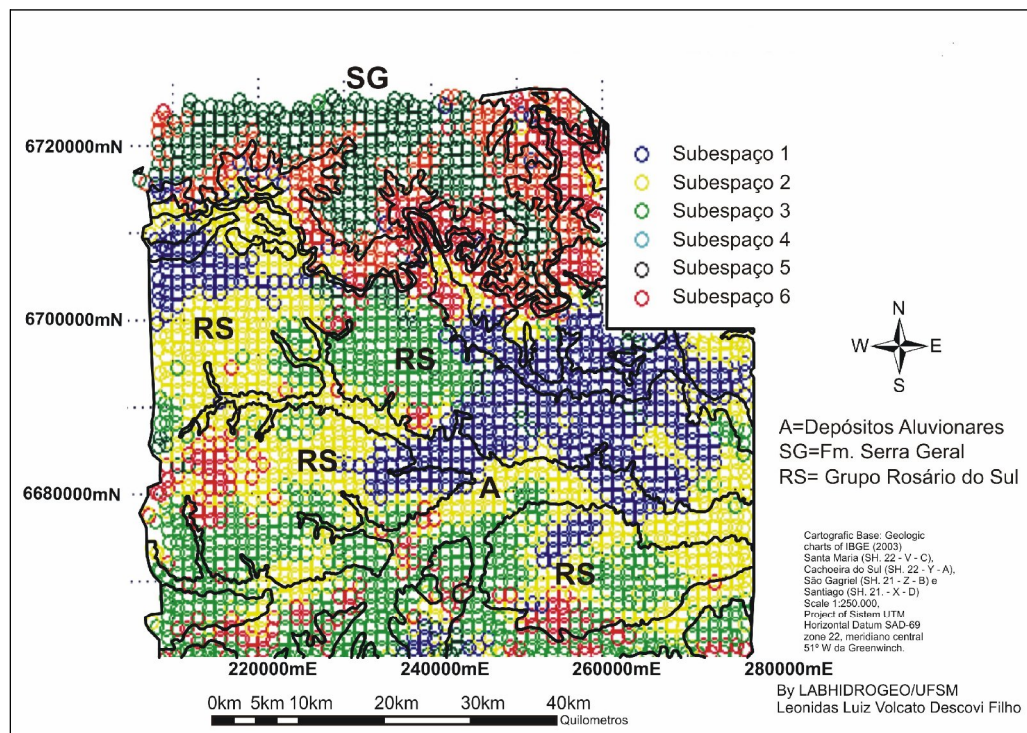


Figura 4.23 Mapa de localização dos padrões identificados sobre os contornos das formações geológicas.

A Figura 4.23 apresenta o posicionamento dos padrões sob a superfície de contornos das formações geológicas, indicando que os mesmos não se distribuem aleatoriamente e que determinadas regiões concentram padrões característicos, que devem seguir uma determinada

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

lei física a ser determinada. A tabela 4.41 apresenta as medidas descritivas para as variáveis geofísicas em cada uma das regiões delimitadas por os subespaços obtidos no sistema de identificação de padrões.

Tabela 4.41 - Médias das variáveis geofísicas e escores por padrão de classificação.

Classificação	Mag.	CT	K	Th	U	F1	F2	F3
1	23754 a	1905 a	0,71 a	0,46 a	1,10 a	-0,334 a	-1,261 a	-0,245 a
2	23830 b	1716 b	0,59 b	0,47 a	0,76 b	-0,377 b	0,033 b	-0,673 b
3	23898 c	2091 c	0,75 c	0,54 b	1,12 a	-0,168 c	1,113 c	-0,442 c
4	23836 d	3312 d	1,48 d	1,03 c	1,38 c	1,751 d	-0,029 d	-0,335 d
5	23853 e	4115 e	1,62 e	0,94 d	4,01 d	0,956 e	0,143 e	1,909 e
6	23845 f	2402 f	0,85 f	0,43 e	2,16 e	-0,612 f	0,192 f	0,639 f

Obs. Nas colunas médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente ($P < 0,01$).

CAPÍTULO 5**DISCUSSÃO**

A intensidade magnética total medida mostra um gradiente regional em direção Norte, onde estava localizado o baixo magnético terrestre, conforme pode ser visto na figura 5.1. A figura 5.1B foi construída para uma data próxima daquela da aquisição dos dados magnetométricos pelo Projeto Camaquã e mostra que a região alvo desse estudo está localizada numa zona em que a intensidade magnética diminui fortemente na direção NNE.

A figura 5.1 mostra que os basaltos (β_1) e os dacitos (α_1) da Formação Serra Geral localizam-se em zona de menor intensidade magnética total do que as formações sedimentares subjacentes (Formação Rio do Rasto, Fm. Rosário do Sul e Fm. Botucatu). Nesse sentido, deve-se notar que a discriminação estatística das formações (unidades) geológicas foi promovida com base nos dados de medidas de intensidade magnética total (Campo Magnético Terrestre 1972 + Campo Magnético Remanescente das rochas). Essa situação pode dificultar a discriminação de algumas das unidades geológicas presentes na área de estudo devido ao efeito do gradiente decrescente da intensidade magnética total em direção ao norte, onde estão as unidades da Fm. Serra Geral derrames vulcânicos.

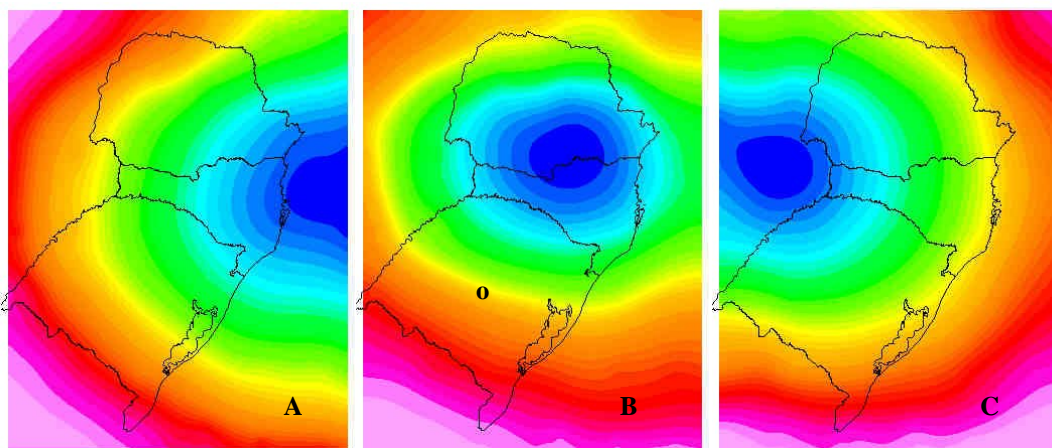


Figura 5.1 – Variação secular da localização do baixo magnético terrestre e da Intensidade do Campo Magnético Total para os anos de (A) 1945, (B) 1975 e (C) 2005. As cores azuis indicam os menores valores de intensidade magnética (22000 nT), enquanto as cores rosa indicam os valores máximos de intensidade magnética (25000 nT). Mapa construído por meio do programa GEOSOFT com base no modelo do IGRF (*International Geomagnetic Reference*

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Field). **o** indica a posição da região alvo deste estudo (Santa Maria, RS, Brasil).

A intensidade do campo magnético terrestre (CMT), dada a sua magnitude, pode mascarar, por vezes, diferenças sutis de magnetização remanescente entre as rochas ou unidades geológicas. Dessa forma, o mesmo estudo estatístico descritivo realizado para os valores de intensidade magnética total medidos no aerolevanteamento da CPRM em 1972 (Projeto Camaquã 1010, Área I) foi executado sobre os valores de magnetização remanescente (remoção do IGRF: *International Geomagnetic Reference Field*) e sobre o resultado da aplicação do filtro Sinal Analítico (Figura 5.2). A análise estatística, então, mostra que a intensidade magnética remanescente é capaz de discriminar mais adequadamente as unidades geológicas da região de Santa Maria (RS); somente não são estatisticamente discerníveis a Fm. Serra Geral β_1 (basaltos) da Fm. Botucatu (Figura 5.2). Por outro lado, a aplicação do filtro Sinal Analítico mostra que todas as unidades geológicas da região são estatisticamente distintas.

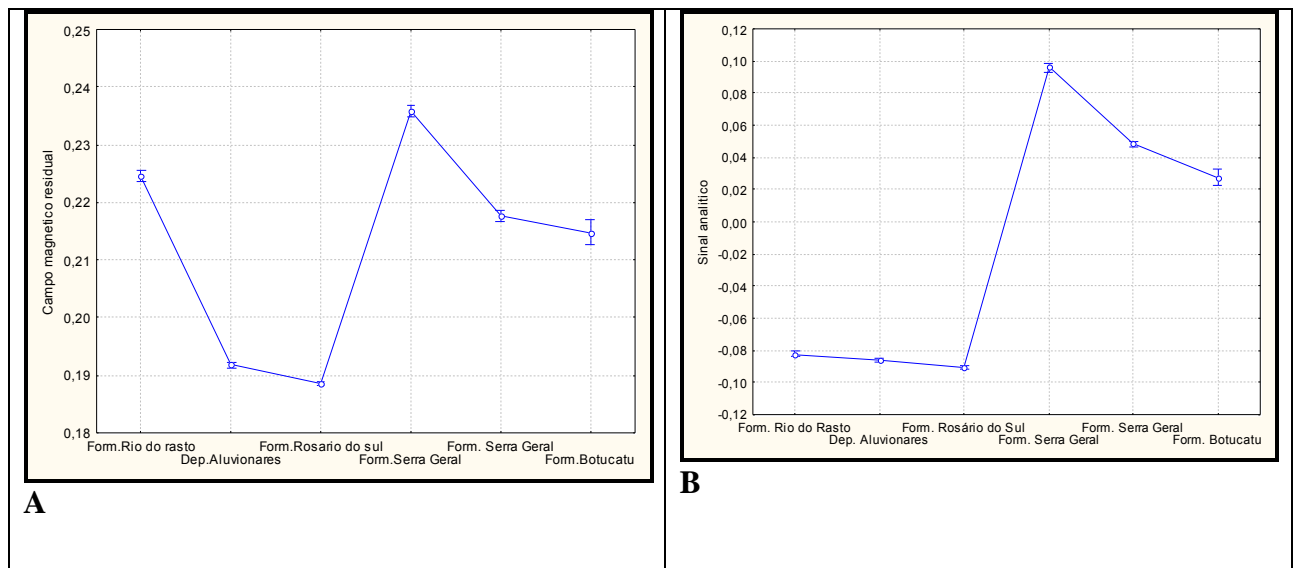


Figura 5.2 - Dispersão das médias da intensidade de magnetização remanescente (**A**) e resíduo da filtragem de Sinal Analítico (**B**) nas diferentes formações geológicas na região de Santa Maria (RS).

A Formação Rio do Rasto está aflorando na porção mais sul da área de estudo (Figura 3.2), onde a intensidade do Campo Magnético Terrestre foi maior. No entanto, esse fator único não explica a forte distinção magnética existente entre essa formação e a Formação Rosário do Sul, que também está aflorando desde o limite sul da área estudada.

Essas duas formações (Rio do Rasto e Rosário do Sul) possuem uma constituição litológica muito parecida: são rochas sedimentares clásticas, finas e arenosas, oriundas do intemperismo, transporte, deposição e diagênese de rochas pré-existentes. Nota-se que, aparentemente, a constituição litológica não justificaria uma distinção tão clara em termos de valores de intensidade magnética total (Figura 4.3). Porém, depois de removido o *IGRF*, a Formação Rio do Rasto mantém altos valores de magnetização remanescente e é claramente distinguida da Formação Rosário do Sul (Figura 5.2 A). A alta intensidade magnética da Formação Rio do Rasto sugere que os minerais responsáveis por tal característica não foram degradados intempericamente durante os processos de erosão, transporte e deposição dos sedimentos que lhe deram origem associados a um paleoclima de características reductoras. Ao contrário, os minerais primários magnéticos devem ter sido quase que totalmente degradados nos arenitos do Grupo Rosário do Sul, depositados no Período Permo-Triássico, em paleoambiente flúvio-eólico de características mais quentes; nessa condição o intemperismo químico poderia oxidar os minerais magnéticos, conferindo uma intensidade magnética mais baixa, semelhante àquela dos sedimentos aluvionares atuais (areias inconsolidadas).

A Formação Botucatu, por sua vez, é constituída granulometricamente por um arenito fino a médio, de natureza arcoseana, derivado predominantemente do intemperismo físico de rochas granito-gnáissicas e/ou vulcânicas ácidas do embasamento cristalino (Escudo Sul-Riograndense). Este teria evoluído em condições paleoclimáticas áridas a semi-áridas (provavelmente quentes), portanto com baixa quantidade de água no sistema. Assim, haveria possibilidade de preservação dos minerais primários magnéticos, os quais lhe conferiram uma alta e variável intensidade magnética total. Porém, tais condições não justificam uma magnetização mais intensa dos arenitos da Formação Botucatu, uma vez que as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral apresentam um conteúdo mais elevado do mineral Ti-magnetita, conforme descrito em vários trabalhos (p.ex.: Bellieni *et al.*, 1984). A remoção do Campo Magnético Terrestre pelo modelo *IGRF* e a aplicação do filtro Sinal Analítico mudam drasticamente a posição relativa da Formação Botucatu em relação à Formação Serra Geral (comparar as figuras 5.1 e 5.2).

As médias da magnetização remanescente (Figura 5.2A) ainda não permitem distinguir a Fm. Serra Geral (β_1) e a Fm. Botucatu, mas mostram que as rochas vulcânicas ácidas da Fm.

Serra Geral (α_1) estão mais magnetizadas do que as rochas basálticas. A discriminação entre a Fm. Serra Geral (β_1) e a Fm. Botucatu ocorre a partir da aplicação do filtro Sinal Analítico (Figura 5.2B). Em qualquer dos casos, os basaltos (β_1) e os dacitos (α_1) são claramente distinguíveis entre si (Figura 5.2). Os basaltos (β_1) possuem uma intensidade magnética total mais elevada do que os dacitos (α_1) (Figura 5.2.A), o que é função do gradiente decrescente de Sul para Norte do Campo Magnético Terrestre. Isso fica claro a partir da remoção do *IGRF* (Figura 5.2 A) e da aplicação do filtro Sinal Analítico (Figura 5.2 B), cujos resultados mostram que os dacitos (Fm. Serra Geral α_1) possuem valores estatisticamente diferentes dos apresentados pela Fm. Serra Geral (β_1) e desta com a Formação Botucatu.

A concentração de potássio em rochas sedimentares clásticas, como os folhelhos, é aproximadamente duas vezes superior àquela dos arenitos (26.600 ppm e 10.700 ppm, respectivamente), de acordo com Mason (1971). De acordo com Vinogradov e Ronov (1956 *apud* Wedephol 1966), os arenitos apresentam um valor médio de 2,1% de K_2O . Para a região de Santa Maria, Silvério da Silva (1997) observou valores na faixa de 0,19 a 2,03 (%) de K_2O , para rochas sedimentares granulares mesozóicas do Grupo Rosário do Sul, ilustradas na tabela 5.1.

O arcabouço geológico da Folha Santa Maria, conforme mapeamento da CPRM (1995 e 1998), é formado basicamente por rochas sedimentares clásticas (Fm. Rio do Rasto, Grupo Rosário do Sul, Formação Botucatu e os sedimentos aluviais recentes) e ainda por rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral (constituída por derrames de composição ácida α_1 e básica β_1). Cada uma dessas formações sedimentares granulares é constituída por um arcabouço predominantemente quartzoso, com teores variáveis de feldspatos, micas e minerais acessórios, contendo potássio na sua composição mineralógica. Apresentam textura variável, em função do paleoambiente deposicional e mostram diferentes proporções granulométricas de fração areia (2-0,062mm), silte (0,062-0,002mm) e argila (<0,002mm) conforme mostrado por Silvério da Silva (1997). Além disso, as formações sedimentares também mostram diferentes constituintes minerais associados às *fácies* sedimentares, resultado de processos deposicionais e/ou pós-deposicionais associados às fases secundárias de formação de argilominerais. As rochas pertencentes à Fm. Rio do Rasto, ao Grupo Rosário do Sul e aos sedimentos aluviais recentes possuem o quartzo como mineral

mais importante do seu arcabouço; secundariamente, ocorrem feldspatos, micas brancas (illitas) e silicatos complexos, em que o potássio pode estar aprisionado (Sartori et al, 1995) e ainda apresentam diferentes argilominerais (Silvério da Silva et al, 1990) e Silvério da Silva (1997), dentre eles as illitas e os interestratificados I/S (illita/esmectita). Por outro lado, a Fm. Botucatu constitui-se de um arenito de textura média a fina, que regionalmente apresenta concentração variável de feldspatos potássicos, apresentando-se bem litificada com variável grau de diagênese (Gameran, 1979), localmente, apresenta-se silicificado e ainda apresenta *fácies* com seus produtos de alteração com baixo grau de litificação. No campo, a Formação Botucatu é facilmente identificável pela sua estrutura sedimentar constituída de estratificação de alto ângulo, paleoambiente eólico. De acordo com Araújo et al. (1999), sua porosidade varia entre 17 a 30 (%). Na tabela 5.1, é apresentada a faixa de concentração de potássio em percentagem (%), em quatro rochas sedimentares, pertencentes ao Grupo Rosário do Sul. Araújo et al. (1999), tratando da base do Grupo Rosário do Sul, estimaram uma porosidade entre 14 a 24 (%). Portanto, deve-se ressaltar que o comportamento hidráulico diferente entre rochas sedimentares granulares pode resultar em diferentes processos de alteração e/ou transporte em solução de fases secundárias contendo potássio e outros elementos.

As concentrações de potássio obtidas mostram perfeitamente a distinção entre os grupos de rochas sedimentares litificadas Formação Rio do Rasto, o Grupo Rosário do Sul, depósitos aluviais recentes e a Formação Botucatu (Tabela 5.1).

As concentrações de potássio na Formação Rio do Rasto e no Grupo Rosário do Sul, e os depósitos aluviais são significativamente inferiores às dos sedimentos arenosos da Formação Botucatu. A figura 4.9 sugere que a matriz dos arenitos da Formação Botucatu esteja associada percentualmente a maiores quantidades de minerais potássicos, tais como os feldspatos potássicos, do que nas outras litologias, de modo a justificar uma maior emissão de radiações gama no canal do **K**. Análises geoquímicas do arenito intertrápico da Fm. Botucatu, realizadas na região adjacente aos municípios de Sobradinho – Salto do Jacuí, mostram uma ampla variação no conteúdo de K_2O , situada entre 0,9 e 7,3 (%) de acordo com a tabela 5.1. O teor médio da concentração de K_2O nos arenitos intertrápicos situa-se em 3,0 %, (Heemann, 1997), e corrobora a avaliação apresentada em relação à resposta mais efetiva dos quartzoarenitos da Formação Botucatu em relação aos arenitos argilosos do Grupo Rosário do

Sul.

As emissões de radiação gama nos sedimentos da Formação Rio do Rasto e do Grupo Rosário do Sul, por outro lado, não diferem significativamente entre si. Dessa forma, tais rochas sedimentares não puderam ser distinguidas pelo seu conteúdo de potássio em aerolevantamentos geofísicos, como na área em estudo. Os sedimentos aluviais recentes, embora apresentem uma concentração muito próxima daquela dos sedimentos da Formação Rio do Rasto e do Grupo Rosário do Sul, mostram valores significativamente menores, em termos estatísticos, do que essas duas formações e, portanto, podem ser distinguidos nos dados de aerolevantamentos.

Os derrames vulcânicos da Formação Serra Geral mostraram-se perfeitamente distinguíveis no aerolevantamento geofísico avaliado na área em estudo. De um modo geral, as rochas vulcânicas apresentam concentrações de potássio (25.900 ppm) bem superiores àquelas apresentadas pelas rochas sedimentares. As emissões radioativas de potássio na unidade geológica Fm. Serra Geral tipo (α_1), que contém as vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias (CPRM, 1998), são maiores em relação às efusivas básicas do tipo (β_1) da Fm. Serra Geral, composta predominantemente por basaltos do tipo Gramado (Heemann, 1997); (Strieder & Heemann, 2006). Esses resultados mostram que os basaltos da Fm. Serra Geral (efusivas básicas do tipo β_1) em áreas adjacentes à estudada possuem um conteúdo variável de K_2O , situado entre 0,8 e 3,0 %, enquanto as rochas dacíticas (efusivas tipo α_1) apresentam um conteúdo que varia entre 3,5 e 5,6 %, (Tabela 5.1). A mineralogia dos dacitos da Fm. Serra Geral seria formada por aproximadamente 20-25 % de feldspato potássico ($KAlSi_3O_8$), enquanto os basaltos toleíticos, semelhantes aos que ocorrem na Folha de Santa Maria CPRM (1998), possuem um máximo de 5% (Heemann, 1997). Assim, pode-se verificar que a grande diferença mineralógica e geoquímica entre as rochas vulcânicas básicas tipo (β_1) e as ácidas tipo (α_1) está adequadamente refletida nos dados do aerolevantamento geofísico da CPRM (1998).

A figura 4.9, que ilustra a dispersão das médias da variável potássio em diferentes formações, mostra que a concentração de potássio na Fm. Botucatu é menor do que aquela das rochas básicas e ácidas da Fm. Serra Geral. Além disso, a variação na concentração de

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

potássio dos arenitos da Fm. Botucatu não alcança nem se superpõe à variação das rochas vulcânicas. Esse resultado é diferente daquele obtido por meio de análises geoquímicas de rocha (Tabela 5.1). Tal situação pode ser o resultado da atuação dos processos intempéricos desenvolvidos em clima tropical, em que o feldspato potássico dos arenitos é decomposto e o K_2O é removido em solução pelas águas, podendo formar os argilominerais na forma de illitas.

Assim, os resultados obtidos permitiram demonstrar que houve variações estatisticamente significativas entre as rochas sedimentares e também foi possível separar os tipos composicionais básicos e ácidos em base a suas respostas ao levantamento aerogeofísico realizado para a variável potássio.

Tabela 5.1 – Composição média das rochas vulcânicas (básicas e ácidas), e arenitos intertrápicos da Fm. Botucatu na região de Sobradinho-Salto do Jacuí.

Elemento químico	Basalto intergranular	Basalto glomeropórfiro	Dacito	Arenito Fm. Botucatu	Grupo Rosário do Sul	Concentração
SiO ₂	49-54	50-52	67-71	79,96	67-80	%
Al ₂ O ₃	12,0-14,6	11,9-15,0	11,8-12,3	7,75	5,6-13,7	%
Fe ₂ O ₃	9,5-14,5	10,0-12,5	5,0	3,20	1,2- 7,8	%
MnO	0,14-0,19	0,11-0,17	0,04-0,10	0,06	0,04-8,5	%
MgO	3,0-5,8	3,8-5,7	0,19-0,86	0,43	0,44-1,00	%
CaO	7,0-9,6	8,3-9,4	0,65-2,40	0,80	0,04-0,06	%
Na ₂ O	1,7-3,2	1,4-2,3	2,5-2,9	1,24	0,03-0,11	%
K ₂ O	0,8-3,0	0,53-1,59	3,5-5,6	0,9-7,3	0,19-2,03	%
TiO ₂	1,0-1,8	0,86-1,20	0,6	0,37	0,10-0,79	%
P ₂ O ₅	0,15-0,20	0,12-0,19	0,20-0,22	0,13	0,03-0,12	%
U	0,8-1,6	0,6	5,0	2,92	1,9-8,7	ppm
Th	4,0-5,0	3,5	17,0	8,98	7,2-31,0	ppm
Teor SiO ₂	Básica	Básica	Ácida	Rochas sedimentares clásticas		

Obs. – Fonte dos resultados: Heemann (1997) e Strieder & Heemann (2006), para as rochas da Formação Serra Geral e Botucatu adjacente à Folha Santa Maria. Para o Grupo Rosário do Sul o valor médio de 4 amostras de rochas sedimentares analisadas por ICP/MS por Silvério da Silva (1997) e Silvério da Silva & Menegotto (2005).

Diversas pesquisas anteriores podem subsidiar a discussão dos resultados obtidos neste trabalho relativos às concentrações e/ou dispersão do Urânio em rochas, dentre eles: Hawkes e Webb (1965), Mason (1971), Wedephol (1966), Gamerman (1979), Bidone (1980), Khalaf (1988), Rocha (1992), Silvério da Silva (1997), Heemann (1997), Silvério da Silva e Menegotto (2005), Silvério da Silva et al. (2006 a), Strieder e Heemann (2006). De acordo com Hawkes e Webb (1965), o Urânio ocorre como mineral primário associado às estruturas cristalinas de zircão ($ZrSiO_4$ estável, podendo conter $U_3O_8 \geq 1,5\%$), apatita $Ca_5 (F, Cl, OH) \cdot (PO_4)_3$ (moderadamente estável) e na allanita=ortita $(Ca, Ce)_2 \cdot (Al, Fe)_3 \{Si_2O_7\}, \{SiO_4\} O \cdot \{O, OH\}$ instável). Uraninita (UO_2) ocorre como um constituinte primário de rochas graníticas e pegmatitos e também como mineral secundário, associado aos minérios de prata, chumbo e cobre de Jonanngeogenstadt, Marienberg e Schneeberg, na Saxônia (Dana- Hurlbut, 1976).

De acordo com Menegotto (2005), a mobilidade de um elemento varia com o tipo de mineral hospedeiro. O U^{4+} presente nos silicatos primários, como ultratraço no zircão ($ZrSiO_4$), como traço na torita ($ThSiO_4$) e como elemento varietal na uranotorita ($UThSiO_4$), é insolúvel como o Th (ambos têm mesmo raio iônico e mesma valência). Entretanto, o U pode ser lixiviado como U^{6+} (Uranila), o que não ocorre com o tório. A solubilidade do U é tanto maior quanto maior for o seu teor no mineral; assim, o U da Uranotorita é mais facilmente lixiviado do que o da torita e, desta, mais que o do zircão.

Torianita (ThO_2) e Uraninita (UO_2) formam uma série isomorfa (minerais do sistema cúbico). A liberação do U oxidado da série faz com que o Th recristalize como Torianita, que é um dos minerais mais estáveis no ciclo exógeno. Hawkes e Webb (1965) consideraram os depósitos minerais primários de Urânio na forma de uraninita (intermediário entre UO_2 e UO_3 , um óxido complexo de Urânio, instável; a presença de U^{6+} deve-se, provavelmente, ao processo de oxidação. Seus minerais secundários são carbonatos complexos, fosfatos e

vanadatos. As fases aquosas mais importantes são $(\text{UO}_2)^{2+}$ e $(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3^{4-}$.

Comparando-se os resultados obtidos para as rochas sedimentares clásticas apresentadas na tabela 4.15, as concentrações de Urânio na Formação Rio do Rasto, nos Depósitos Aluvionares arenosos e nas rochas sedimentares areno-argilosas pertencentes ao Grupo Rosário do Sul, a faixa de variação da concentração de Urânio foi baixa entre 1,17 a 1,21 ppm e valor médio 1,19 ppm. Por outro lado, observa-se que as concentrações médias mais elevadas de Urânio (3,41 ppm) estão associadas aos arenitos quartzosos pertencentes à Formação Botucatu. Esses arenitos contendo cimentação na forma de películas de óxido-hidróxidos de Fe/Mn, de coloração avermelhada, formam *red beds* e ainda apresentam argilominerais caulíníticos e illitas os quais poderiam adsorver parte do Urânio Gamerman (1979).

Esse comportamento anômalo, que apresenta maior concentração média de Urânio na Formação Botucatu (Fig. 4.15), pode relacionar-se com aspectos paleoclimáticos, de ambiente eólico e/ou com coprecipitação de Urânio associado em películas de óxido/hidróxidos de Fe/Mn associados aos processos diagenéticos. Baseado em Hawkes e Webb (1965), o Urânio é extremamente móvel sob condições alcalinas e oxidantes, limitadas pelo Eh (potencial de oxi-redução) de redução do complexo de uranila UO_2^{+2} . Salienta-se que, devido à alta mobilidade do Urânio no solo, este pode ser lixiviado por reagentes fracos, fato que ajudaria na localização de áreas alvo, nas campanhas de prospecção econômica de Urânio (Holland et al., 1957 ; 1958).

Khalaf (1988) estudando a petrografia e a diagênese de silcretos (concreções silicosas) no Kuwait, Golfo Árabe, salientou a importância de alguns calcretos (concreções calcárias) associados em camadas vermelhas de *red beds* que podem apresentar fontes econômicas de Urânio, alumínio e sulfatos. Silvério da Silva (1997) e Silvério da Silva & Menegotto (2006) estudaram as concentrações de Urânio em diversas rochas sedimentares de Idade Mesozóica da região de Santa Maria e suas concreções (silcretos e calcretos) com uso de *Inductively Coupled Plasma/ Mass Spectrometer* (ICP/MS). As camadas de *red beds* foram formadas durante a formação dos paleoambientes flúvio-eólicos durante a deposição do Grupo Rosário do Sul, mais especificamente das camadas vermelhas silto-argilosas da Formação

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Santa Maria (Membro Alemoa). Também ocorreu durante a deposição dos arenitos eólicos da Formação Botucatu.

Heamann (1997) e Strieder & Heamann (2006) encontraram valores de Urânio na faixa entre 0,8 a 1,6 ppm nos basaltos intergranulares pertencentes à Formação Serra Geral, enquanto para os basaltos glomeropórfiros um valor médio de 0,6 ppm. Para os dacitos, encontraram um valor bem superior, da ordem de 5,0 ppm. Esses autores ainda encontraram concentrações de 2,92 ppm para os arenitos pertencentes à Formação Botucatu. Sivério da Silva (1997) encontrou valores na faixa de 1,9 a 8,7 ppm, para os arenitos argilosos pertencentes à Formação Rosário do Sul do Grupo Rosário do Sul (equivalente à Formação Pirambóia nos Estados de São Paulo e no Paraná).

De acordo com Hawkes e Webb (1965), o Urânio é um elemento litófilo e pode associar-se com V, As, P, Mo, Se, Pb e Cu em depósitos sedimentares resultantes de intemperismo em ambientes desérticos. Seu potencial iônico, isto é, a relação entre a carga elétrica e o seu raio iônico ($Z/r=4$) é média para o U^{4+} , sendo precipitado por hidrólise, dessa forma, seus íons estão associados com os grupos hidroxila das soluções aquosas. Esses autores apresentaram diferentes concentrações médias de Urânio em rochas sedimentares arenosas 0,45 ppm, 1 ppm em folhelhos e 1 ppm em solos.

Drever (1997) apresentou valores médios de 2 ppm de Urânio em arenitos, descreveu a importância de variações nas condições paleoambientais de oxirredução nas águas subterrâneas em arenitos associadas aos depósitos de Urânio do tipo *Roll-front* (avanço com o fluxo subterrâneo). O processo de intemperismo das rochas converte o U^{4+} (insolúvel), por oxidação, para o estado U^{6+} (solúvel em água), na forma de complexos de uranila (UO_2)²⁺.

Bidone (1980) estudou vários índices relativos aos depósitos de Urânio associados às rochas sedimentares e *red beds* na região norte ocidental da Bacia Neogênica de Roussillon, na França, encontrando associações de Urânio adsorvido/coprecipitado com películas de óxidos-hidróxidos em torno de partículas de grãos arenosos e/ou fases de argilominerais.

De acordo com Rocha (1992), a província uranífera de Lagoa Real, localizada no centro-sul da Bahia, contém diversas jazidas de Urânio descobertas por levantamento aerogeofísico (radiométrico). O contexto geológico inclui um embasamento arqueano-proterozóico inferior, parte do Craton São Francisco. As mineralizações de Urânio relacionam-se às fácies de gnaisses albitizados do Complexo Lagoa Real (Proterozóico inferior). Estudos geomorfológicos preliminares revelaram dois contextos preferenciais para explicar as anomalias radiométricas encontradas: a zona de escarpa, onde se encontram todas as jazidas conhecidas; e o alto platô, com anomalias fracas e difusas. A jazida Laranjeiras é um bom exemplo de jazida de encosta. Ela é recoberta por um manto de alteração laterítico típico de ambientes tropicais. Os estudos geoquímicos mostram que o Urânio lixiviado das mineralizações migra com elementos associados, em direção a jusante. A relação entre o Urânio remobilizado e sua expressão radiométrica superficial foi estabelecida. As fases minerais secundárias, portadoras de Urânio, foram identificadas nos perfis de alteração. O Urânio ocorre adsorvido aos produtos de alteração amorfos, particularmente nos oxihidróxidos de Ferro-Titânio e nos produtos argilosos ricos em 'CE' (camadas expansivas Illitas-Smectitas).

Silvério da Silva (1997) e Silvério da Silva & Menegotto (2005) estudaram as concentrações de Urânio em concreções carbonáticas (calcretes), obtendo uma média de 2,6 ppm, e uma faixa de variação entre 0,8 a 10,0 ppm, em seis amostras. Já em rochas sedimentares silicosas, o valor médio obtido foi 4,9 ppm, com uma variação entre 1,8 a 14,0 ppm em dez amostras. Em crostas silicificadas, o valor médio obtido foi de 3,8 ppm, com uma faixa de variação entre 1,9 a 8,7 ppm, concluindo que esses materiais não formaram barreiras efetivas na concentração de Urânio. Silvério da Silva et al. (2006 a) estudaram a concentração de Urânio em águas subterrâneas de fontes/nascentes, associadas às rochas ígneas da Formação Serra Geral e às arenosas da Formação Botucatu, na fronteira do Estado do Rio Grande do Sul com o Uruguai. Encontraram valores desse elemento abaixo do Limite de Quantificação do ICP/MS (< 5 ppt). Silvério da Silva & Menegotto (2005) concluíram que alguns elementos-traços apresentaram concentração relativa nos silcretos, em relação às rochas sedimentares onde estavam inseridos, especialmente U, W, Mo, Co e Ta nos estudos de balanço de massa realizados para a região de Santa Maria.

Dessa forma, buscando-se subsídios em trabalhos anteriores para explicar valores médios de concentração, o Urânio dos arenitos eólicos da Formação Botucatu poderia estar associado por adsorção/coprecipitação à formação de películas de óxido-hidróxidos em grãos de quartzo do arcabouço dos arenitos e/ou associados às fases dos argilominerais peliculares (Gamerma, 1979).

A figura 4.15 mostra que a média de Urânio no levantamento aerogeofísico é mais alta nas rochas vulcânicas básicas (3,758 ppm) do que nas rochas vulcânicas ácidas (1,981 ppm), ao contrário do que normalmente se espera para essas litologias (Haswes & Webb, 1965).

Alguns valores de concentração aparentemente anômalos podem estar relacionados com os arenitos interderrames, pertencentes à Formação Botucatu, que também apresentaram valores médios mais elevados. Essas ocorrências foram identificadas por Silvério da Silva et al. (2006 b) para áreas vizinhas localizadas a oeste no Município de Toropi. O afloramento de arenitos intertrape, quando ocorrem, são de dimensões não mapeáveis na escala de 1:250.000 (CPRM, 1998); apresentam às vezes áreas com dimensões de 200 m x 50 m. Esses arenitos também ocorrem em subsuperfície e foram identificados em diversos poços tubulares em Toropi/RS. Assim, acredita-se que os valores médios de Urânio mais elevados nas rochas vulcânicas básicas do tipo (β_1) estariam associados aos arenitos interderrames e/ou a seus afloramentos no rebordo da Serra Geral que ocorrem na região avaliada. Porém também é possível que o Urânio tenha migrado, em solução, a partir das porções mais elevadas da encosta da Serra Geral (vulcânicas ácidas) para as porções de sopé da serra (vulcânicas básicas), à semelhança do que ocorre nas encostas do complexo Lagoa Real (Rocha, 1992).

Esses aspectos combinados, ou individuais, devem estar atuando no sentido de fornecer valores superficiais mais elevados de Urânio para as rochas vulcânicas básicas em relação as rochas vulcânicas ácidas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou a possibilidade de se distinguirem as diferentes unidades geológicas por meio da análise estatística a partir de dados aerogeofísicos gamaespectométricos e magnetométricos.. A análise estatística multivariada fatorial das variáveis geofísicas padronizadas mostrou-se uma ferramenta eficiente para a redução do número de variáveis em estudo. Os escores gerados através dela proporcionaram valores para variáveis ortogonais padronizadas com média zero e variância um, que serviram de forma adequada para a criação de vetores de coordenadas tridimensionais de pontos centrados em

$[0;0;0]$ e com matriz de variâncias $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, o que permitiu a classificação espacial da

ocorrência conjunta das variáveis em estudo.

- O sistema de classificação desenvolvido foi eficiente para identificação de 6 padrões distintos de comportamento de forma individual para cada variável e para a combinação de todas as variáveis.

O presente estudo mostrou que os níveis do campo magnético da região de Santa Maria, RS, Brasil, ocorrem de forma distinta nas diferentes formações geológicas estudadas (sedimentos inconsolidados aluvionares, arenitos e rochas ígneas vulcânicas).

Os resultados obtidos evidenciaram a possibilidade de se distinguirem as diferentes unidades geológicas por meio de seus valores característicos de magnetometria.

O presente estudo mostrou que as concentrações de Potássio, Tório e Urânio ocorrem de forma distinta nas diferentes formações geológicas estudadas (sedimentos

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

inconsolidados aluvionares, arenitos e rochas ígneas vulcânicas). Dentro desse contexto, é possível definir valores característicos e os seus intervalos de confiança para cada uma das formações geológicas estudadas

A metodologia de identificação de padrões através de ferramentas multivariadas, aqui desenvolvida, transpõe as limitações de alguns métodos geoestatísticos na medida em que não requer pressupostos de estacionaridade.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARÈDE, F. 1995. **Introduction to Geochemical Modeling**. Cambridge University Press, 543 p.
- ALMEIDA FILHO R. & CASTELO BRANCO, R. G. 1992. Location of Kimberlites using LANDSAT Thematic Mapper images and aerial photographs: the Redondão diatreme, Brazil. **International Journal Remote Sensing**, 13(8): 1449 – 1457.
- ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P. E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with de Navajo-Nugget aquifer system, USA. **Hydrogeology Journal**, 7(3): 317-336.
- BARMP, 1997. **Brazil Airborne Radiometric Mapping Project**. Paterson, Grant & Watson Limited (PGW). *Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)* and Geological Survey of Canada (GSC), Rio de Janeiro, 18p.
- BASTOS, R.O. 2002. **Radiação Gama natural de distintos litotipos e a estimativa de dose a eles associada, em municípios do leste do estado de São Paulo**. Instituto de Geociências Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Dissertação de Mestrado, p. 58.
- BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; NARDY, A.J.R.; C.; PICCIRILLO, E.M.; ROISENBERG, A. 1884. High and low-TiO₂ flood basalts from the Paraná Plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **N.J. Mineral. Abhl.**, 150: 273-306.
- BENALL, H.; BUVAT, I.; FROUIN, F.; BAZIN, J.P.; PAOLA, R. 1994. Foundations of factor analysis of medical image sequences: a unified approach and some practical implicatrions. **Image and Vision Computing**, vol. 12(6), 375-385
- BETEJTIN, A. **Curso de Mineralogia, Moscou**. editora Paz. p. 731.
- BEZDEK, J. C. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithm. IEEE Transctions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **PAMI -2**, p1-8, 1980.
- BIDONE, E. D. 1980. **Les índices d'uranium du Pliocene de la región nord occidentale du bassin neogene du Roussillon dans leur cadre sedimentologique**. Thèse Docteur-Ingénieur. France- Institut National Polytechnique de Lorraine-Nancy- France-INPL.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

- BLUM, M L. B.; SILVA, A. M.; JOST, H.; MENESES, R.; FUCK, R. A.; BROD, J. A.; TEIXEIRA, A. A.; DA SILVA, A. A. C.; SPIGOLON, A. L. D.; MAAS, M. V. R.; DE SOUZA, M. M.; MACEDO Jr., P. M.; LIMA, B. E. M.; DE SOUZA, M. O. C. Aplicação de dados aerogeofísicos no mapeamento geológico do limite entre os terrenos Arqueanos e Proterozóicos da região de Crixás-Cedrolina, Goiás. **RBG**, 2001. 31(3): 279-286.
- BOHAM-CARTER, G. F. 1996. **Geographical information systems for geocientists: Modeling with GIS**. Pergamon, 398p.
- BOUCHRIKA, I.; NIXON, M.S. 2002. **Exploratory factor analysis of gait recognition. Conference on Pattern Recognition**, vol. 1, 115-118
- BRASIL, Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais CPRM. **Mapeamento geológico integrado da bacia hidrográfica do Guaíba**. Folha de Santa Maria, escala 1:250.000. Brasília. DNPM. 1998.
- BRASIL, **Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais-CPRM**
<http://www.cprm.gov.br/aero/aero.htm>. 2006.
- Bruin, M.; Korthoven, J.M.; Bakels, C.C. and Groen, F.C.A. 1972. The use of non-destructive activation analysis and patterns recognition in the study of flint artefacts. *Archaeometry*, vol. 14(1), 55-63
- BUFFON, S. A. 2002. Integração de dados geofísicos e geológicos na avaliação ambiental e epidemiológica de radiações naturais (Radônio) no Escudo Sul-Riograndense (Rio Grande do Sul-Brasil). Dissertação de Mestrado. PPGEM, UFRGS. p.150.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1987.
- BUSSAB, W. & MORETTIM, P. A. **Estatística básica**. 5a.ed. São Paulo: Saraiva, 2002.
- CARMELO, A. C. & MENESES, P. R. **Metodologia para integração de Imagens Gamaespectométricas e TM/LANDSAT-5 através do IHS**. Anais VIII Simpósio de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 1996, INPE, p.615-620.
- CHECA, R.; MANZANO, E.; RODRÍGUEZ-SIMÓN, L.R.; CAPITAN-VALLVEY, L.F. 2006. Comparison between traditional and pattern recognition (SIMCA) strategies in classification of old proteinaceous binders. IN: Mediterranean Meeting on Multivariate Analysis and Chemometrics applied to Environment and Cultural Heritage, Nemi (Italy),

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

October 2006, 2 pp.

COCHRAN, W. G. & COX, G. M. **Experimental designs**. Toronto: John Wiley & Sons, 1957.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). 1995. Mapa hidrogeológico da Folha de Santa Maria. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto de Previsão dos recursos hídricos subterrâneos, color, escala 1:100.000.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). 1998. Mapeamento geológico integrado da Bacia Hidrográfica do Guaíba, color. , Escala 1:250.000.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). 2007: <<http://www.cprm.gov.br/sensoriamentoremoto>>. Acesso em 20/01/2007. Org. Dra. Monica Mazzini Perrota.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM).2006: <http://www.cprm.gov.br/aero/1000/aero1000.htm>>. Acesso em 20/06/2006.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS/CPRM/FEPAM/PRÓ-GUAÍBA 1998. Projeto Mapeamento Integrado da Bacia Hidrográfica do Guaíba, Folha de Santa Maria, escala de 1: 250.000, agosto. Módulo I- Projeto Monitoramento do Solo.

DANA, J.D. & HULRBUT, C.JR. 1976. **Manual de Mineralogia**. Tradução para o português Rui Ribeiro Franco. Livros técnicos e científicos editora S.A., Rio de Janeiro, 2 volumes.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in Geology**. New York: John Wiley & Sons, 1973.

DEUTSCH, C.V. 2002. **Geostatistical Reservoir Modeling**. Oxford University Press, 376p.

DICKSON, B.L. & SCOTT, K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-assign the geochemical factors. **AGSO Journal Geology & Geophysics**, v.17, n.2, p.187-200, 1997.

DREVER, J. I. 1997. **The geochemistry of natural waters- Surface and groundwater environments**. Third edition. University of Wyoming, p. 436.

Drexler, C.; Mattern, F. and Denzler, J. 2002. Appearance based generic object modeling and recognition using probabilistic principal component analysis. IN: Luc van God Ed., 24th Symposium of the German Association for Pattern Recognition, Springer-Verlag, 100-

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

108 pp.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G. MONTEIRO, A. V. M. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004. 209p.

FERREIRA, J. L.G. **Discriminação de produtos de alteração hidrotermal através de análise espectrorradiométrica e imagens digitais Tm (estudo de caso no *Greenstone Belts de Guarinos*)**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília - Instituto de Geociências, 1993.

GAMERMAN, N. 1979. **Contribution a l'étude de la diagênese des grès: couleur rouge, argiles authigènes et induration. Formations d'Estrada Nova, De Rosário do Sul et de Botucatu (Brésil) et Buntsandstein des Vosges (France)**. Thèse Docteur-Ingénieur, Mémoire 59, Centre National de la Recherche Scientifique Université Louis Pasteur de Strasbourg Institut de Géologie, p.121 et planches XXI.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística experimental**. 13^a. ed. Piracicaba: Nobel, 1990.

GOOVAERTS, P. 1997. **Geostatistic for Natural Resources Evaluation**. New York Oxford University Press, 483p.

GUREVICH, I.; HARAZISHVIH, D.; JERNOVA, I.; NEFYODOV, A.; TRYKOVA, A.; VOROBEV, I. 2003. Discriminative power of Lymphoid cell features: factor analysis approach. **IN: 8th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, A. Sanfelin and J. Ruiz-Shulcloper Ed.**, Springer-Verlag, pp. 298-305

HASWOKES, H.E. & WEBB, J.S. 1965. **Geochemistry in mineral exploration**. A Harper international student reprint, p. 415.

HEEMANN, R. 2005. **Modelagem estrutural e tridimensional para a prospecção e avaliação dos depósitos de ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (RS)**. Porto Alegre, Tese de Doutorado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ix, 150 f. : il.

HEEMANN, R. **Geologia, controles e guias prospectivos para depósitos de ágata na região de Salto do Jacuí (RS)**, Porto Alegre, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 107p.

HSU, F.S.; GOOD, B.W.; PARRISH, M.E.; CREWS, T.D. 1982. Pattern recognition for analysis of cigarette smoke by capillary gas chromatography. Part 1: total particle matter

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

- (TPM). **Journal of High Resolution Chromatography**, vol. 5(12), 648-655
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998. p. 514-585.
- JURS, P.C. 1986. Pattern recognition used to investigate multivariate data in analytical chemistry. *Science*, vol. 232(4755), 1219-1224
- KEYSERS, D.; MACHEREY, W.; NEY, H.; DAHMEN, J. 2004. Adaptation in statistical pattern recognition using tangent vectors. **IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence**, Vol. 26(2), 269-274
- KHALAF, F.I. 1988. Petrography and diagenesis of Silcrete from Kuwait, Arabian Gulf. **Journal of Sedimentary Petrology**. Pergamon Press. Printed in Great Britain, 58, n. 6: 1014-1022.
- KHATTREE, R.; NAIK, D. N. **Multivariate data reduction and discrimination, with SAS software**. North Carolina: SAS institut Inc. Books By Users. John Wiley & Sons, 2000.
- KOUTSIAS, N.; MALLINIS, G.; KARTERIS, M. 2009. A forward/backward principal component analysis of Landsat-7 ETM⁺ data to enhance the spectral signal of burnt surfaces. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, V. 64(1), 37-46
- KRAUSKOPF, K. B.; KONRAD, B. **Introdução à Geoquímica**. São Paulo: USP, 1972. 293p.
- KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Johanesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African**, v.52, n.6, p.119-139, 1951.
- MASON, B., 1971. **Princípios de geoquímica**, São Paulo, Polígono, Editora da USP. XI, 403p.: il.
- MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, v.58, n.8, p.1246-1266, 1963.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Paris: Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleu, 1971. 211p.
- MATHEWS, J.D.; BUCKLEY, J.D.; GLEDHILL, V.X. 1974. Pattern recognition in medicine – a place for the use of principal component analysis and factor analysis. **Internal Medicine Journal**, vol. 4(5), 509-515

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

- MAYER, L. P. **Probabilidade. Aplicações à Estatística.** Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1976.
- MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for Engineering: A tutorial. Engineering applications of fuzzy logic. **Proceedings of the IEEE**, v.83, n.3, 1995.
- MENEGOTTO, E. 2005. Intemperismo. **Notas de aula Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Curso de Pós-graduação em Geociências, inédito. p. 107.
- MILSON, J. **Field Geophysics.** 3th ed. John Wiley: New York, 2003, 225 p.
- MORRIS, R.J. 2004. **Statistical pattern recognition for macromolecular crystallographers.** Acta Crystallographica, Biologiccal Cristallography section, D60, 2133-2143
- NETER, J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models.** Georgetown, Ontário: Richard D. Irwin INC, 1974, 841 p.
- NOMOTO, N.; SHINOHARA, Y.; SHIRAKI, T.; KOBAYASHI, T; OTSU, N. 2005. A new scheme for image recognition using higher-order local autocorrelation and factor analysis. IN: **IAPR Conference on Machine Vision Application**, May 2005, Tsukuba Science City (Japan), 265-268 pp.
- PAL, S.K.; MAJUMDAR, T.J. AND BHATTACHARYA, A.K. 2007. ERS-2 SAR and IRS-1C LISS III data fusion: a PCA approach to improve remote sensing based geological interpretation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Volume 61(5), 281-297
- PARADELLA, W. R.; VITORELLO, I.; LUI, C. C.; MATTOS, J. T.; DUTRA, L. V.; MENESES, P. R. 1990. Imagens do Satélite SPOT-1 em Mapeamento Geológico: um estudo comparativo com vários produtos de sensores no vale do Rio Curaçá, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**; 20(1-4): 282-292.
- PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos. Estratégias metodológicas para as Ciências da saúde, humanas e sociais.** São Paulo: Edusp, 2001. 156p.
- PEREIRA, J. E. S. 2007. **Aplicação de técnicas matemáticas não determinísticas na integração de dados geológicos, geofísicos e de geoquímica de solo para geração de mapas de uso e ocupação na região do município de Santa Maria, RS, Brasil.** Exame de Qualificação de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

Alegre, p 66.

PEREIRA, J. E. S. 2006. <http://jespestatistica.ccne.ufsm.br>.

PRINCE, S.J.D.; WARELL, J.; ELDER, J.H.; FELISBERTI, F.M. 2008. **Tied factor analysis for face recognition across large pose differences. IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence**, Vol. 30(6), 970-984

QUADROS, T. F. P. 2000. **Integração de dados em mapeamento de favorabilidade mineral para ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)**. Tese de doutoramento, PPGEMM, DEMIN, Porto Alegre, Escola de Engenharia, UFRGS, 260p.

REIS, E. **Estatística multivariada aplicada**. Lisboa: Edições Sílabo, 1997.

ROCHA, E. B. 1992. **Dispersão e redistribuição de Urânio e acompanhadores em mineralizações uraníferas submetidas à alteração lateritizante: exemplo da jazida Laranjeiras. Província uranífera de Lagoa Real, Bahia**. Tese de doutorado, Instituto Geológico e Astronômico, USP/ IGA, São Paulo, p.150.

ROLIM, S. B. A.; PARADELLA, W.R.; VASCONCELLOS, R. M.; AZEVEDO, M. L. V. 1993. Metodologia para sensores no vale do Rio Curaçá, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, 20, 1-4: 282-292.

SAPUCAIA, N. S. **Diferenciação litológica de teores de urânio e tório e taxa de produção de calor radiogênico do embasamento cristalino das bacias de Camamu e Almada**. Universidade Federal da Bahia. Dissertação de mestrado. 2004. 97 p.

SAPUCAIA, N. S. **Diferenciação litológica, teores de potássio, urânio e tório e taxa de produção de calor radiogênico do embasamento cristalino das bacias de Camamu e Almada**. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. 2002. 96p.

SARTORI, P., L., P.; SILVÉRIO DA SILVA, J., L. e KAWASHITA, K. 1995. Idades radiométricas K-Ar e indicações sobre a área fonte das micas dos arenitos fluviais da Formação Sanga do Cabral, UFRGS. In: 2^o Simpósio de Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná, Porto Alegre, Boletim Resumos, p. 111-113.

SILVA da N. C. **Classificação semi-automática de imagens de sensoriamento remoto por meio de síntese genética de redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília - Instituto de Geociências, 2003.121p.

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

- SILVÉRIO DA SILVA, J. L. & MENEGOTTO, E. 2005. Aspectos Geoquímicos de silicificações em rochas sedimentares no Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 32, 2. pdf
- SILVÉRIO DA SILVA, J. L. 1997. **Estudo dos processos de silicificação e calcificação em rochas sedimentares Mesozóicas do Rio Grande do Sul, Brasil**. Tese de Doutorado em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS. p. 157, pranchas XLV e 106 figuras.
- SILVÉRIO DA SILVA, J. L. et al. 2006 a. Estudo da caracterização de áreas de recarga e descarga do SAG em Santana-Rivera e Quaraí-Artigas. Estudo da vulnerabilidade na área de influência de Quaraí-Artigas. Projeto N°10, Fundo das Universidades, OEA/GEF. Relatório Final Julho de 2006. p. 195 e anexos. Disponível em <http://www.sg-guarani.org/fundo> das universidades. Acessado em 10 maio 2007.
- SILVÉRIO DA SILVA, J. L. et al. 2006 b. **Mapeamento dos aspectos físicos com sistema de informações geográficas para monitoramento e gestão integrada no Município de Toropi-Estado do Rio Grande do Sul**. Relatório Final de projeto. p. 51, ilustrado com mapa geológico e mapas temáticos na escala de 1:50.000. Inédito, relatório restrito.
- SILVÉRIO DA SILVA, J.,L.; MENEGOTTO, E. & MEDEIROS, E. R. 1990. Avaliação preliminar dos argilominerais nas folhas de Santa Maria e Camobi, RS. **Revista Ciência e Natura**, volume 12, p.127-132.
- SIROTINSKAYA, S. & STRIEDER, A., J., 2006. **Lógica matemática na integração de dados e na modelagem: I – Elementos e métodos básicos de lógica matemática**, Editora da UFRGS, Porto Alegre (Brasil), no prelo.
- SOUZA, A. M.: VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria. Departamento de Estatística: UFSM, 2005. 112 p.
- STATÍSTICA, version 7.1, series:115 a, Statsoft, INC. 2005.
- STRIEDER, A., J. & HEEMANN, R. 2006. Structural constraints on Paraná basalt volcanism and their implications on agate geode mineralization (Salto do Jacuí, RS, Brazil). **Pesquisas em Geociências**. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre. vol. 33(1): 37-50.
- TRIVINOS, A. N. S. 1987. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa**

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

- qualitativa em educação.** São Paulo: Atlas, p. 175.
- VASCONCELLOS, R. M.; METELO, M. S.; MOTA, A. C.; GOMES, R. D. **Levantamentos geológicos no Brasil em Geofísica.** Rio de Janeiro: CPRM/DIGEOF, 1994. 172p.
- WALT, C.; BARNARD, E., 2006, Data characteristics that determine classifier performance. **IN: Proceedings of the 17th Annual Symposium of the Pattern Recognition Association of South Africa (Parys, South Africa)**, 6 pp. (available upon: <http://hdl.handle.net/10204/1038>)
- WEDEPHOL et al. 1966. **Handbook of geochemistry.** Springer-Verlang. Berlin – Heidelberg-New York, Vol. 1, p.402.
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n.2, p. 201-216.1997.
- WIRSZ, D.F.; BLADES, M.W. 1986. Application of pattern recognition and factor analysis to inductively coupled plasma optical emission spectra. *Anal. Chem.*, vol. 58 (1), 51–57
- XIMENES, A. de C., RIBEIRO, J. R.; AMARAL, S. Mapas auto-organizáveis e parâmetros geofísicos para a caracterização da heterogeneidade de paisagens. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Barsil, 21-26 abril 2007, IMPE. P. 3219-3226.
- ZHANG, H.W.; SONG, W.H.; YANG, H.; ZHANG, M.J. 2008. Pattern recognition prediction of coal and gas outburst hazard in the sixth mine of Hebi. **Journal of Coal Science & Engineering**, Vol. 14(2), 248-251(a)
- ZHANG, Z.; KWOK, J.; YEUNG, D.Y.; CHANG, E.Y. 2008. Sliced coordinate analysis for effective dimension reduction and nonlinear extensions. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, vol. 17(1), 225-242 (b)
- ZORTEA, M.; HAERTEL, V.; CLARKE, R. T. Investigação sobre métodos para redução da dimensionalidade dos dados em imagens hiperespectrais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.1, n.57, p 36 – 42. 2005.

APÊNDICES

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

APÊNDICE A - Sequência de programas, em linguagem do MatLab, empregados na análise dos dados.

O primeiro programa carrega o arquivo de dados, define os parâmetros e transforma o arquivo em uma grade regular em que cada observação é média de observações obtidas a cada 1,5625 km² que correspondem a 0,25 cm² no mapa.

```
% Carrega o arquivo e define os parametros$
%transforma arquivo em grade regula%
M=load('-ascii', 'tese911.txt');
[n,c]=size(M);%n=numero de observacoes e c numero de variaveis%
Temp=zeros(n,c);
MinimoX=min(M(:,1));
MinimoY=min(M(:,2));
Celula1=(fix((M(:,1)-MinimoX)/1250))+1;
Celula2=(fix(((M(:,2)-MinimoY)/1250)));
Celula=Celula1+Celula2*57;
M=[M Celula];
[tmp,idx]=sort(M(:,8));
M=M(idx,:);
for i=(min(Celula)):(max(Celula));
    q=max(find(Celula==i));
    if isempty(q);
        [q]=0;
    end
    d(i,1)=q;
end
[tmp,idx]=sort(d);
d=d(idx);
a=min(find(d>0));
```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

```
b=(size(d)-a);  
r=(1:b);  
d=d(r,1)  
for d=1:b  
    Mtemp(d,:)=mean(M(d:(d+1),1:7));  
end  
save('Mtemp');  
end
```

APÊNDICE B – Padronização dos dados.

O segundo programa realiza a padronização dos dados e sobre os dados padronizados faz uma análise estatística multivariada fatorial. Calcula as cargas dos fatores, realiza uma rotação do tipo Varimax e calcula os escores. Gera novo arquivo com os valores dos scores obtidos na análise fatorial.

```
% Realiza o sequenciamento dos pontos definidas na analise fatorial%
```

```
  %Carrega arquivo ordenado%
```

```
%Calcula os Componentes Principais e Analise Fatorial%
```

```
% Carrega o arquivo e define os parametros$
```

```
load('Mtemp');
```

```
M=Mtemp;
```

```
[n,c]=size(M);%numero de observacoes%
```

```
v=5;%numero de variaveis de estado%
```

```
Z=zeros(n,5);
```

```
F=M(:,3:7);
```

```
E=[M(:,1) M(:,2)];
```

```
MedF=mean(F);
```

```
VarF=var(F);
```

```
Dp=std(F);
```

```
for i=1:v
```

```
  Z(:,i)=(F(:,i)-MedF(:,i))/(Dp(:,i));
```

```
end
```

```
S=cov(Z);
```

```
[V,D]=eig(S);%V=autovetores e D matriz de autovalores%
```

```
Y=Z*V; %componentes principais%
```

```
RAV=sqrt(eig(S));%raiz quadrada dos autovalores%
```

```
  for i=1:v
```

```
    Coef(:,i)=RAV(i)*V(:,i);%coeficientes da analise Fatorial%
```

```
  end
```


Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

```

Lambda(:,1:5)=[Coef(:,5) Coef(:,4) Coef(:,3) Coef(:,2) Coef(:,1)];
end
%estabelece a rotina de rotaçao Varimax%
tol=0.00001;
sign=1;
d=5; % munero de variaveis%
L=5;%numero de Fatores%
Lsig=3; %numero de fatores significativos
[d,L]=size(Lambda);
h=sqrt(sum(Lambda.^2))+exp(-700);
temp=Lambda./(h*ones(1,L));
V=[sum(sum(temp.^4))-sum(sum(temp.^2).^2)/d];
V_old=V*(1-2+tol);
while abs(V(length(V))-V_old)>tol*V(length(V))
    V_old=V(length(V));

    for i=1:Lsig-1
        for j=i+1:Lsig
            %angulo otimo para rodar as colunas i,j%
            x= Lambda(:,i)/h;
            y= Lambda(:,j)/h;
            u= x.*x-y.*y;
            v=2*x.*y;
            t= atan2(2*(d*u'*v-sum(u)*sum(v)), d*(u'*u-v'*v)-sum(u)^2+sum(v)^2)/4;
            % rotaçao antihoraria do angulo t%
            temp= [Lambda(:,i) Lambda(:,j)]*[cos(t) -sin(t); sin(t) cos(t)];
            Lambda(:,i)=temp(:,1);
            Lambda(:,j)=temp(:,2);

        end
    end
end
end

```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

```

%Novo valor para função objetivo%

h = sqrt(sum(Lambda!.^2))+exp(-700);
temp=Lambda./(h*ones(1,L));
V=[(sum (sum(temp.^4))-sum(sum(temp.^2).^2)/d)];%função objetivo%
end
    if sign >0
    for i=1:L
        if sum(Lambda(:,i))<0
            Lambda(:,i)= -Lambda(:,i);
        end
    end
elseif sign<0

    for i=1:L
        if sum(Lambda(:,i))>0
            Lambda(:,1)= -Lambda(:,i);
        end
    end
end
    Coef=Lambda;
    Psi=S-(Coef*Coef);%matriz de erros%
Scores=(inv(Coef*inv(Psi)*Coef))*Coef*inv(Psi)*Z';
Scoresel=Scores';
Scoresel=Scoresel(:,1:3);
MEFScores=[E F Scoresel];
save('MEFScores')
end

```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

APÊNDICE C – Cálculo da solução inicial para dimensão ótima dos sub espaços.

Terceiro programa. Calcula uma solução inicial para dimensão ótima dos sub espaços, através do sequenciamento das observações.

```

load('MEFScores')
[M]=(MEFScores);
[n,c]=size(M);%n= numero de observa. e c= numero de variaveis%
j=1;
H=ones(n,1);
A=zeros(n,c+1);
B=ones(n,c+1);
D=ones(n,1);
N=ones(3,1);
B=B*-4;
d=6;%numero de classes%
% ordena na sequencia de vizinhos mais proximos%
for j=1:n;
    E=[M(:,1) M(:,2)];
    F=[M(:,3) M(:,4) M(:,5) M(:,6) M(:,7)];
    U=B(:,8:10);
    L=[M(:,8) M(:,9) M(:,10)];
    Y=[L-U];
    YY=(Y.*Y)*N;
    M=[E F L YY];
    [tmp,idx]=sort(M(:,11));
    C=M(idx,:);
    A(j,:)=C(1,:);
    for i=1:n
        B(i,:)=C(1,:);
    end
end

```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

```

r=(2:n);
C=C(r,:);
M=M(r,:);
B=B(r,:);
n=n-1;
M=C;
YY=zeros(n,1);
end
%calcula a media, avariancia e o desvio padrao da distancia entre dois vizinhos%
R=[A,H];
Dist(:,1)=sqrt(A(:,11));
    Mediadist=mean(Dist);
    Vardist=var(Dist);
    Dpdist=sqrt(Vardist);
Ls=(Mediadist+3*Dp);
Li=(Mediadist-3*Dp);
n=j;
G=ones(j,1);
%classifica cada observacao%
r=1;
    for i=1:n;
        H(i,1)=(Dist(1:i,1)*D(1:i,1));
        if H(i,1)<(r*n*Mediadist/d);
            G(i,1)=r;
        else
            m(r)=i;
            r=r+1;
        end
    end
end
M=[A G];
[tmp,idx]=sort(M(:,12));
M=M(idx,:);

```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

```
MAG=[A G];  
save('MAG');  
end
```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

APÊNDICE D - Otimização através do método simplex, modificado.

Quarto programa, efetua otimização através do método simplex, modificado.

```
%Otimiza os valores dos Fatores%
load('MAG');
load('Mediafator');
M=MAG
N=ones(3,1);
[n,r]=size(M);
L=[M(:,8:10)];
for j=1:6;
    for i=1:n
        U(i,1:3)=Mediafator(j,1:3);
    end
    Y=[L-U];
    YY=sqrt((Y.*Y)*N);
    Distfatores(:,j)=YY;
end
[mn,G]=min(Distfatores');
G=G'
Distfatores=zeros(n,6);
for i=1:n;
    Distfatores(i,G(i))=1;
end
fobjetivo=trace(L'*L)-
trace(inv(Distfatores'*Distfatores)*(Distfatores'*L)*(Distfatores'*L))
Mediafator=inv(Distfatores'*Distfatores)*(Distfatores'*L)
[mn,j]=min(diag(inv(Distfatores'*Distfatores)*(Distfatores'*L)*(Distfatores'*L')));
Pivo=Mediafator(j,:)
End
```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

APÊNDICE E- Imprime resultados.

Quinto Programa imprime os resultados obtidos a partir da otimização.

```
%imprime mapa%
```

```
load('R');
```

```
M=R
```

```
[n,r]=size(M);
```

```
    %imprime o mapa%
```

```
    for i=1:n ;
```

```
        if M(i,12)==1;
```

```
            set(plot(M(i,1),M(i,2),'o'),'Color',[1 0 0])
```

```
            grid on
```

```
            hold on
```

```
        elseif M(i,12)==2;
```

```
            set(plot(M(i,1),M(i,2),'o'),'Color',[0 1 0])
```

```
            grid on
```

```
            hold on
```

```
        elseif M(i,12)==3;
```

```
            set(plot(M(i,1),M(i,2),'o'),'Color',[0 0 1])
```

```
            grid on
```

```
            hold on
```

```
        elseif M(i,12)==4;
```

Aplicação de técnicas estatísticas à integração de dados geológicos, geofísicos na região do município de Santa Maria, RS, Brasil

```
set(plot(M(i,1),M(i,2),'o'),'Color',[1 1 0])

grid on

hold on

elseif M(i,12)==5;

set(plot(M(i,1),M(i,2),'o'),'Color',[0 1 1])

grid on

hold on

else M(i,12)==6;

set(plot(M(i,1),M(i,2),'o'),'Color',[1 0 1])

grid on

hold on

end

end

end
```


Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)