



Número: 396 / 2008

*Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP*

*Instituto de Geociências*

*Pós-Graduação em Geociências*

*Geologia e Recursos Naturais*

**FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO**

***As Técnicas NASVD e MNF e sua Aplicação na  
Redução de Ruídos em Dados Gamaespectrométricos***

Dissertação apresentada ao  
Instituto de Geociências como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Geociências.

**Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal**

**Co-Orientadora : Profa. Dra. Adalene Moreira Silva**

**CAMPINAS - SÃO PAULO**

Agosto – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO  
Sistemas de Bibliotecas da UNICAMP/  
Diretoria de tratamento da informação  
Bibliotecário: Helena Joana Flipsen – CRB-8ª / 5283

**Cavallaro, Francisco de Assis.**

C314t

As técnicas NASVD e MNF e sua aplicação na redução de ruídos em dados gamaespectrométricos / Francisco de Assis Cavallaro. -- Campinas, SP : [s.n.], 2008.

Orientadores: Rodrigo de Souza Portugal, Adalene Moreira Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Espectrometria de raio gama. 2. Controle de ruído.
3. Ruído. I. Portugal, Rodrigo de Souza. II. Silva, Adalene Moreira. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. IV. Título.

Título e subtítulo em inglês: NASVD and MNF methods applied for noise reduction in airborne gamma-ray spectrometry.

Palavras-chave em inglês (Keywords): Gamma ray spectrometry, Noise control, Noise.

Área de Concentração: Geologia e Recursos Naturais.

Titulação: Mestre em Geociências.

Banca examinadora: Emilsom Pereira Leite, Fernando Brenha Ribeiro.

Data da Defesa: 26-08-2008

Programa de Pós-Graduação em Geociências.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

AUTOR: FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO

*As Técnicas NASVD e MNF e sua Aplicação na  
Redução de Ruídos em Dados Gamaespectrométricos*

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal  
CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

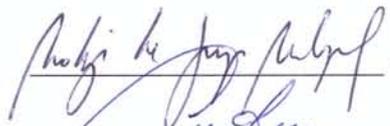
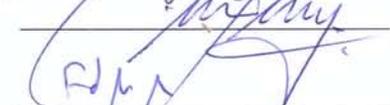
Aprovada em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal

Prof. Dr. Emilson Pereira Leite

Prof. Dr. Fernando Brenha Ribeiro

 - Presidente  
  


Campinas, 26 de agosto de 2008



*Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP*

*Instituto de Geociências*

*Pós-Graduação em Geociências*

*Geologia e Recursos Naturais*

*As Técnicas NASVD e MNF e sua Aplicação na Redução de Ruídos em  
Dados Gamaespectrométricos*

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO**

**RESUMO**

O processamento atual em gamaespectrometria necessita de novas ferramentas para auxiliar a remoção de ruídos, visto que ao final desta etapa há constatação de ruído remanescente. O ruído remanescente prejudica de forma expressiva os produtos finais. O decaimento radioativo é um processo aleatório e a estimativa de todas as medidas é governada por leis estatísticas. Os perfis de taxas de contagem são sempre "ruídos" quando utilizados períodos curtos como um segundo para cada medida. Os filtros utilizados e, posteriormente, as correções efetuadas no processamento atual de dados gamaespectrométricos não são suficientes para remover ou diminuir consideravelmente o ruído oriundo do espectro. Dois métodos estatísticos que atuam diretamente nos dados coletados, isto é, nos espectros vêm sendo sugeridos na literatura para remover estes ruídos remanescentes: o *Noise-Adjusted Singular Value Decomposition* – NASVD e *Maximum Noise Fraction* – MNF. Estes métodos produzem uma redução no desvio padrão de forma significativa. Neste trabalho eles foram implementados dentro do ambiente de processamento do software OASIS MONTAJ e aplicados em uma área compreendida por dois blocos, I e II do levantamento aerogeofísico que recobre a porção oeste da Província Mineral do Tapajós - sudoeste do Estado do Pará e sudeste do Estado do Amazonas. Os dados filtrados e não-filtrados foram processados e comparados usando os coeficientes determinados pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S.A. Os resultados da comparação entre perfis e mapas apresentaram-se de forma promissora, pois houve um ganho na resolução dos produtos.



*Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP*

*Instituto de Geociências*

*Pós-Graduação em Geociências*

*Geologia e Recursos Naturais*

***NASVD and MNF Methods Applied for Noise Reduction in Airborne  
Gamma-ray data***

**MASTERS THESIS**

**FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO**

**ABSTRACT**

The gammaespectrometry processing needs new tools to help the noise's removal, at the end of this step there are evidence of remaining noise; this remaining noise causes damages at the final product. The radioactive decline is a random process and the estimate of the measures is managed by statistical laws. The profiles of counting ratios are always noisy when analyzed for short periods, like a second for each measurement. Filters and corrections made in the airborne gamma-ray spectrometric data processing are not enough to remove or reduce the spectrum's noise. Two statistic methods which act directly at collected data, i.e., in the spectrum domain, the literature has been suggesting to remove such remaining noises, the Noise-Adjusted Singular Value Decomposition – NASVD and Maximum Noise Fraction – MNF. These methods produce a significant reduction in the standard deviation. In this work both methods were implemented in the software OASIS MONTAJ environment and applied in one area between two blocks, I and II of the airborne survey which covers the west area of Mineral Province of Tapajós – southwest of Pará state and southeast of Amazonas state. The filtered and not filtered data were processed and compared using the coefficients determined by Lasa Engenharia e Prospecções S.A. The results of the comparison done, using maps and profiles showed up a promising form; therefore, these products had gained resolution.

## **Dedicatória**

Dedico a minha família pela paciência, pelas noites e finais de semana que fiquei de frente ao computador, pelo estímulo de minha esposa Toshika e pela compreensão dos meus filhos: Heitor e Arthur (Heithur) que mesmo não entendendo meu trabalho ensinam-me todos os dias que uma imagem ou melhor que a conduta vale mais que mil palavras.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

Aos meus pais e irmãos pelos incentivos em todos os momentos da minha vida.

Aos meus orientadores: Rodrigo Portugal e Adalene M. Silva que me mostraram os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores, em especial ao Prof. Álvaro, meu primeiro contato nesta universidade, pois através de seu curso tive meu primeiro contato com Análise de Componentes, inspiração para este trabalho.

Aos colegas e funcionários do departamento do IG em especial as moças da secretaria: Valdirene, Edinalva, Aline e Helena por toda a atenção e ajuda que me deram na conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Jen Hovgaard da Technical University of Denmark pela atenção dada as minhas dúvidas e pelos artigos e tese, gentilmente enviados.

À FUGRO-LASA nas pessoas de Luis Braga e César Marinho por terem cedidos, gentilmente, os dados da área estudada.

À AGPLA e aos colegas pelo apoio e incentivo a este trabalho, em especial Francisco Andrade e João Luis.

Aos membros da banca pelas correções e sugestões apresentadas quando da defesa da tese.

Mas, não poderia deixar de dar meu agradecimento especial a meus amigos que de uma forma ou de outra contribuíram muito para a conclusão desta dissertação:

Aos amigos da academia de kung-fu em especial meu mestre, Barbosa, pela ajuda na busca da disciplina.

Ao Ricardo Akira pelo suporte em programação.

À Vera Nogueira pela gentileza de fazer a correção do português deste trabalho, mas, principalmente, pelo exemplo de vida que dá quando trabalhamos juntos ou quando simplesmente tomamos chá na PRÓVIDA.

Aos Geofísicos: Artem e Leandro pela ajuda e aprendizado no processamento, opinando e sugerindo infundáveis testes para o aprimoramento dos resultados, apesar da dificuldade da comunicação em português no caso do Artem. Também ao Luciano pelas inúmeras dezenas de cafezinhos, onde foram tomadas importantes decisões em relação a este trabalho e ao entendimento prático da matemática e da física em gamaespectrometria.

Aos meus amigos Ariathemis e Ana que mostraram na acepção da palavra o significado da palavra amizade, estando ao meu lado em todos os momentos, até o fim.

Finalmente, ao meu amigo Sr. Rios que com todo amor e carinho de um pai conduz a mim e a minha família a veredas tranqüilas, ao verdadeiro caminho, e que me dignifica com sua presença.

## SUMÁRIO

1 -INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Apresentação e Justificativas.....	1
1.2 - Motivação.....	2
1.3 - Estrutura da Dissertação .....	3
1.4 - Materiais.....	4
2 -Revisão bibliográfica .....	5
2.1 - Radioatividade e Gamaespectrometria.....	5
2.1.1 - Radioatividade .....	5
2.1.2 - Atividades de Elementos.....	6
2.2 - Gamaespectrometria.....	8
2.2.1 - Interação dos raios gama com a matéria .....	8
2.2.2 - Espectro de Energia.....	9
2.3 - Gamaespectrômetro.....	10
2.4 - Cristais Detectores de cintilação .....	11
2.5 - Gamaespectrometria Aplicada em Aerolevramento .....	14
2.6 - Coleta de dados gamaespectrométricos em aerolevamentos .....	15
2.7 - Seleção das janelas energéticas do U, Th e K .....	16
2.8 - Processamento de dados.....	17
3 -OS MÉTODOS NASVD E MNF .....	20
3.1 - A natureza do ruído em gamaespectrometria .....	20
3.2 - Análise dos Componentes Principais - ACP .....	21
3.3 - O Método NASVD.....	25
3.4 - O Método MNF.....	28
3.5 - Implementação dos métodos NASVD e MNF .....	30
3.6 - Codificação do Algoritmo NASVD .....	32
3.7 - Testes do Algoritmo NASVD .....	34
3.8 - Codificação do Algoritmo MNF .....	35
3.9 - Testes do Algoritmo MNF .....	36

3.10 -	Interface GX para Filtros NASVD e MNF.....	37
3.11 -	Fundamentação Matemática.....	38
3.11.1 -	Distribuição de Poisson.....	38
3.11.2 -	Análise das Principais Componentes - ACP.....	38
3.11.3 -	Decomposição SVD.....	40
4 -	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NASVD E MNF .....	43
4.1 -	Localização e acesso à área investigada.....	43
4.2 -	Geologia da área estudada.....	44
4.3 -	Dados Gamaespectrométricos .....	47
4.4 -	Processamento dos Dados Radiométricos.....	47
4.4.1 -	Correção do Tempo Morto.....	48
4.4.2 -	Aplicação de Filtragem .....	48
4.4.3 -	Cálculo da Altura Padrão de Vôo .....	48
4.4.4 -	Remoção do Background da Aeronave e Cósmico.....	48
4.4.5 -	Cálculo do <i>Background</i> do Radônio .....	49
4.4.6 -	Estimativa dos Coeficientes Skyshine (a1 e a2) .....	50
4.4.7 -	Correção do Efeito Compton .....	51
4.4.8 -	Correção Altimétrica.....	52
4.4.9 -	Conversão para Concentração de Elementos .....	53
4.5 -	Análise dos filtros implementados NASVD e MNF aplicados a espectros Brutos na Província Mineral do Tapajós.....	55
5 -	CONCLUSÃO.....	71
6 -	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Esquema de decaimento do $^{40}\text{K}$ .....	7
<b>Figura 2.2</b> - Simulação do fluxo de raios gama do Potássio . .....	9
<b>Figura 2.3</b> - Diagrama do fluxo de sinais no espectrômetro nuclear. NaI(Tl): cristal cintilador; PMT: tubo fotomultiplicador; Pré-Amp: pré-amplificador; Amp: amplificador; MCA: analisador multicanal; Comp: computador .....	10
<b>Figura 2.4</b> - Eventos ocorridos no cristal cintilador até a emissão de luz captada pela fotomultiplicadora . .....	11
<b>Figura 2.5</b> - Diagrama esquemático das interações da radiação gama com a matéria .....	13
<b>Figura 2.6</b> - Interações da radiação gama com a matéria . .....	13
<b>Figura 2.7</b> - Diagrama ilustrativo dos pontos amostrados em uma linha de vôo e sua respectiva matriz de espectros ( $M_{\text{original}}$ ). .....	16
<b>Figura 2.8</b> - Janelas padrões utilizadas em aerolevantamentos gamaespectrométricos . .....	17
<b>Figura 2.9</b> - Variação média de K, U & Th para determinadas rochas. ....	19
<b>Figura 3.1</b> - Curva que representa os autovalores de uma ACP sem nenhum tipo de normalização .....	23
<b>Figura 3.2</b> - Espectro típico utilizado em gamaespectrometria .....	24
<b>Figura 3.3</b> - Curva que representa os autovalores de uma ACP depois de normalizado .....	24
<b>Figura 3.4</b> - Espectro decomposto em 6 componentes .....	27
<b>Figura 3.5</b> - Esquema ilustrativo dos processos envolvidos na implementação dos métodos NASVD e MNF. ....	31
<b>Figura 3.6</b> - Comparação entre um espectro original de Urânio (linha vermelha) e o mesmo filtrado pelo NASVD (linha preta), utilizando 8 componentes. ....	34
<b>Figura 3.7</b> - Comparação entre um espectro original de Urânio (linha preta) e o mesmo filtrado pelo MNF (linha verde), utilizando 8 componentes. ....	36
<b>Figura 3.8</b> - Janela de interação com o usuário dos filtros NASVD e MNF. ....	37
<b>Figura 3.9</b> - Janela de interação com a opção por tipo de filtro. ....	38
<b>Figura 4.1</b> - Localização do levantamento aerogeofísico Projeto Província Aurífera do Tapajós	44

<b>Figura 4.2</b> - (a) Localização e compartimentação tectônica da Província Tapajós e (b) mapa geológico integrado e simplificado .....	46
<b>Figura 4.3</b> - Planilha típica contendo os dados gamaespectrométricos do OASIS MONTAJ. ....	56
<b>Figura 4.4</b> - Espectros brutos comparados com os espectros filtrados pelo NASVD, variando a quantidade de componentes (4, 8, 16, 32 e 64 componentes). ....	57
<b>Figura 4.5</b> - A figura ilustra os espectros brutos comparados com os filtrados pelo MNF, variando a quantidade de componentes (4, 8, 16, 32 e 64 componentes).....	58
<b>Figura 4.6</b> - Representação visual da diferença entre $U_{bruto}$ e $U_{filtrado}$ com MNF – 16 componentes. O ruído varia dentro de um intervalo cuja média está próxima a zero. Neste caso há sinal, mas de valor inexpressivo (Tabela 4.5).....	59
<b>Figura 4.7</b> - Perfil do canal de Urânio típico com e sem filtragem e a representação de um intervalo ampliado em algumas vezes. ....	61
<b>Figura 4.8</b> - Comparação entre U, K e Th brutos e os mesmos filtrados pelo Passa-Baixa (Low Pass) – 3 fiduciais (frequência de corte).....	62
<b>Figura 4.9</b> - Comparação entre U, K e Th brutos e os mesmos filtrados pelo MNF (16 componentes) e NASVD (8 componentes).....	64
<b>Figura 4.10</b> - Mapas do Urânio pós-processado: (a) sem filtragem, (b) Passa-Baixa – 3 fiduciais, (c) Passa-Baixa – 5 fiduciais (Frequência de corte). ....	65
<b>Figura 4.11</b> - Mapas de Urânio pós-processados: (a) sem filtragem, (b) filtragem NASVD com 8 componentes, (c) filtragem com Passa-Baixa (Low Pass) – 3 fiduciais (Frequência de corte) e (d) filtragem MNF com 16 componentes com suas <b>respectivas áreas em detalhamento e ampliada</b> .....	<b>66</b>
<b>Figura 4.12</b> - Mapas das diferenças entre Urânio bruto pós-processado com os filtros Passa-Baixa – 3 fiduciais (a), MNF – 16 componentes (b), NASVD – 8 componentes (c). ....	67
<b>Figura 4.13</b> - Mapas de Potássio pós-processados: (a) sem filtragem, (b) filtragem NASVD - 64 componentes, (c) filtragem Passa-Baixa – 3 fiduciais (frequência de corte) e (d) filtragem MNF - 8 componentes com suas respectivas áreas em detalhamento e ampliada.....	68
<b>Figura 4.14</b> - Mapas das diferenças entre Potássio bruto pós-processado com os filtros Passa-Baixa (a), MNF – 8 componentes (b), NASVD – 64 componentes (c).....	70

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Funcionalidade de cada bloco do espectrômetro nuclear.....	11
<b>Tabela 2.2</b> - Janelas padrão utilizadas em aerolevantamentos (IAEA, 1991).....	16
<b>Tabela 4.1</b> - Coeficientes obtidos no vôo Cósico.....	49
<b>Tabela 4.2</b> - Coeficientes $a_u$ , $a_k$ , $a_t$ e $a_{tc}$ e seus respectivos valores obtidos de dados de testes realizados na área do levantamento.....	50
<b>Tabela 4.3</b> - Coeficientes de atenuação atmosférica ( $\mu$ ) para cada um dos canais radiométricos.....	52
<b>Tabela 4.4</b> - Valores de sensibilidade correspondentes às janelas de interesse.....	54
<b>Tabela 4.5</b> - Diferença Percentual das janelas de interesse em relação aos filtros NASVD, MNF e Passa-Baixa, variando-se a quantidade de componentes.....	61

### CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

#### 1 - INTRODUÇÃO

##### 1.1 - Apresentação e Justificativas

Os últimos dez anos têm sido um período de consolidação e evolução para a gamaespectrometria. Com o recente ressurgimento da exploração mundial de Urânio, as técnicas e aplicações retornaram para suas raízes históricas, isto é, o aperfeiçoamento da aquisição dos dados e das técnicas de processamento (THOMSON et al., 2007).

O método gamaespectrométrico é usado principalmente para mapeamento geológico e exploração mineral, utilizando espectrômetros modernos que podem registrar no mínimo 256 canais de dados num intervalo de energia de 0 - 3 MeV (IAEA, 1991). Deste intervalo somente três janelas características de energia de interesse são integradas: Potássio, Urânio e Tório. Estas janelas sofrem correções Tempo Morto (*deadtime*) e Correção de Fundo (*Background*) (IAEA, 1991), remoção de radiação cósmica e Radônio da atmosfera. As janelas são, então, submetidas ao processo de espalhamento Compton (*stripping*) (IAEA, 1991) e conversão de razões de contagem para concentrações aparentes de isótopos (IAEA, 1991, OASIS-MONTAJ - 2003).

O processamento de dados gamaespectrométricos mostra que, mesmo após esta etapa, estes ainda encontra-se ruídos oriundos dos espectros. Assim, filtros matemáticos são aplicados aos perfis ou mapas com a finalidade de atenuar este ruído.

O decaimento radioativo é um processo aleatório, regido pela distribuição de Poisson, e suas medidas apresentam variações estatísticas. Os perfis de taxas de contagem são sempre "ruidosos", principalmente quando utilizados períodos curtos, como um segundo para cada medida, pois quanto maior o intervalo de tempo de integração, menor vai ser a covariância entre medidas repetidas. Observando os filtros disponíveis utilizados no processamento dos dados gamaespectrométricos percebe-se que eles atuam de forma insatisfatória nos perfis, pois eliminam uma porcentagem significativa de sinal junto com o ruído. Estes filtros não levam em conta a natureza estatística do decaimento radioativo. Também nas malhas, onde os dados são representados em forma de composição de cores, os filtros apenas mascaram características indesejáveis.

Os filtros estatísticos, quando aplicados diretamente no espectro, mostram-se mais adequados, pois estes conseguem uma separação sinal/ruído de forma mais eficaz, concentrando o sinal, que reflete as propriedades físicas do meio geológico, e minimizando o ruído de forma que a perda de sinal tenha pouca significância.

Técnicas de processamento de dados em gamaespectrometria ganharam uma maior atenção, resultando em um melhor entendimento e maior aplicação de novas técnicas, destacando-se os métodos *Noise-Adjusted Singular Value Decomposition* - NASVD (HOVGAARD, 1997, HOVGAARD & GRASTY 1997, MINTY & MCFADDEN, 1998) e *Maximum Noise Fraction* - MNF (GREEN et al., 1988, DICKSON & TAYLOR, 1998, 1999 & 2000), utilizados para a redução de ruídos em espectros multicanais. Estes dois métodos estatísticos que atuam diretamente nos dados coletados, isto é, nos espectros, vêm sendo sugeridos na literatura para remover este ruído remanescente (THOMSON et al., 2007).

Tais métodos se baseiam na Análise de Componentes Principais - ACP, que é o caminho natural para trabalhar dados multivariados, como é o caso dos dados gamaespectrométricos e diferenciam-se um do outro pela forma de normalização que utilizam.

Este trabalho pode ser dividido em duas etapas:

(a) implementação dos métodos NASVD e MNF como biblioteca de vínculo dinâmico – dll, acoplando-os (*plug-in*) ao software OASIS MONTAJ - ambiente usual de processamento.

(b) aplicação destes métodos em uma área recoberta por dados aerogamaespectrométricos, em 256 canais, com o conhecimento geológico disponível em escala compatível com o espaçamento de linhas de vôo.

A área de estudo compreende o blocos II do levantamento aerogeofísico que recobre a porção leste da Província Mineral do Tapajós - sudoeste do Estado do Pará e sudeste do Estado do Amazonas e compreende uma área de 74.979 km<sup>2</sup>.

### **1.2 - Motivação**

A partir do convívio com a rotina de processamento dos dados gamaespectrométricos percebeu-se a necessidade de aperfeiçoamento das técnicas utilizadas a fim de melhorar os resultados obtidos, resultando em produtos de melhor qualidade. A implementação dos filtros NASVD e MNF, baseou-se no estado da arte disponível na literatura. A utilização desta

---

implementação teria que ser prática, isto é, estar bem próxima ao ambiente natural do processamento. Para isto, estes métodos teriam que ser implementados como bibliotecas de vínculo dinâmico – dll utilizando os softwares Matlab (versão 7.0) e Visual Studio - C++ (versão 6.0) e acoplados ao ambiente do *software* OASIS MONTAJ (versão 5.18). Assim, a maior motivação foi a aplicação destas técnicas em um conjunto de dados aerolevantados e, principalmente implementando e disponibilizando-os num ambiente natural de processamento.

### 1.3 - Estrutura da Dissertação

A dissertação é composta de 6 capítulos que são descritos a seguir:

1. Introdução: Introdução geral sobre a dissertação com seus objetivos e importância.
2. Revisão Bibliográfica: Descrição dos princípios básicos sobre a radiação nuclear, características e seus efeitos. Também descreve o funcionamento do equipamento, método de detecção de raios gama e determinação de sua energia. Descrição de aplicações de gamaespectrometria como um método geofísico. Processamento dos dados e correções para espectrometria aérea.
3. Os métodos NASVD e MNF: Descrição e implementação da ACP (Análise dos Componentes Principais), NASVD (*Noise-Adjusted Singular Value Decomposition*), MNF (*Maximum Noise Fraction*) e fundamentação matemática.
4. Aplicação dos métodos NASVD e MNF: apresentação da área estudada e sua geologia, coeficientes utilizados no processamento dos dados gamaespectrométricos e análise dos filtros implementados NASVD e MNF aplicados aos dados da área considerada.
5. Conclusão.
6. Referências.

### 1.4 - Materiais

Para este trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- *software* MATLAB (versão 7.0 - MATHWORKS) para desenvolver as funções matemáticas e uma biblioteca externa (arquivo com extensão .dll) para conexão com outros aplicativos e testes preliminares em dados sintéticos;
- *software* Visual C++ da Microsoft para desenvolver uma interface entre a biblioteca (arquivo com extensão .dll) desenvolvida no programa MATLAB e o programa *OASIS MONTAJ*;
- *módulo GX Development - software OASIS MONTAJ* (Versão 5.1.8) para implementação dos métodos no ambiente supracitado;
- Base de dados gamaespectrométricos pertencentes ao Bloco II do Projeto Aurífero do Tapajós de propriedade da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM.

**CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**2.1 - Radioatividade e Gamaespectrometria**

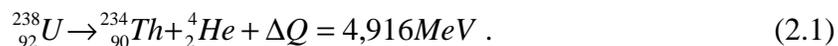
A radioatividade pode ser definida como desintegração espontânea de certos núcleos atômicos. Sempre que ocorre radioatividade, ela é acompanhada pela emissão de partículas alfa, partículas beta ou radiação gama.

Com a gamaespectrometria é possível se obter informações sobre a quantidade de determinados elementos existentes no ambiente, através do espectro de energia de raios gama que determina a quantidade emitida para diferentes energias, onde os processos de desintegração de alguns elementos emitem uma ou mais energias específicas.

**2.1.1 - Radioatividade**

Tudo o que existe na natureza é constituído de átomos ou suas combinações. O núcleo do átomo é formado, basicamente, por partículas chamadas prótons com carga positiva, e de partículas de mesma massa, mas sem carga, denominadas nêutrons. O número de nêutrons no núcleo pode ser variável, pois eles não têm carga elétrica. Com isso, um mesmo elemento químico pode apresentar massas diferentes. Átomos de um mesmo elemento químico com massas diferentes são denominados isótopos (KAPLAN, 1978), dos quais alguns são instáveis e mudam para núcleos mais estáveis pela emissão de radiação ionizante.

Alguns isótopos são instáveis tendo seu núcleo muito energético por possuírem excesso de partículas ou de carga, tendem a ser estabilizar mudando para núcleos mais estáveis pela emissão de radiação ionizante. Um dos processos de estabilização do núcleo é a emissão de partículas alfa, que é um grupo de partículas positivas compostas de dois prótons e dois nêutrons, o que corresponde a um núcleo de hélio (He). O processo de decaimento libera uma energia que corresponde à soma das energias da partícula alfa e do núcleo residual em recuo. Por exemplo, o isótopo  ${}_{92}^{238}U$  decai seguindo o esquema (KAPLAN, 1978):



Outra forma de estabilização, quando existe no núcleo um excesso de nêutrons em relação a prótons, é através da emissão de uma partícula negativa (elétron) resultante da conversão de um nêutron em um próton. É a partícula beta negativa ou, simplesmente, partícula beta. No caso de existir excesso de cargas positivas (prótons), é emitida uma partícula beta positiva, chamada pósitron, resultante da conversão de um próton em um nêutron (KAPLAN, 1978).

A emissão de radiação geralmente se dá por de partículas alfa ( $\alpha$ ) ou beta ( $\beta$ ), que possuem massa, carga elétrica e velocidade, sendo a velocidade dependente do valor de sua energia.

Após a emissão de uma partícula alfa ( $\alpha$ ) ou beta ( $\beta$ ), o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo esse excesso em forma de onda eletromagnética de alta frequência, denominada radiação gama que não possui massa e se propaga na velocidade da luz. Radiações gama são definidas por sua energia, medida em eletron-volt (eV).

### 2.1.2 - Atividades de Elementos

Como é impossível prever o exato momento em que um determinado átomo sofrerá desintegração, cada radioisótopo é caracterizado por sua taxa de desintegração, que é proporcional ao número de núcleos presentes. Então o número de núcleos ( $dN$ ) que decaem durante um curto período de tempo ( $dt$ ) é proporcional ao número de núcleos presentes ( $N$ ).

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N. \quad (2.2)$$

Manipulando a equação (1) e integrando temos:

$$N = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) , \quad (2.3)$$

onde  $\lambda$  é a constante de decaimento (MINTY, 1997).

Meia-Vida é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzido à metade da atividade inicial.

Alguns isótopos radioativos podem decair por mais de um processo. O isótopo  ${}^{40}_{19}\text{K}$  por exemplo, pode decair por emissão de partícula  $\beta^-$ , por captura eletrônica ou por emissão de partícula  $\beta^+$ . O esquema geral de decaimento do  ${}^{40}_{19}\text{K}$  é apresentado na Figura 2.1, onde também

## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

são indicadas as probabilidades de cada decaimento. Os processos que emitem radiação gama, em seu decaimento, têm uma energia específica na emissão da radiação gama.

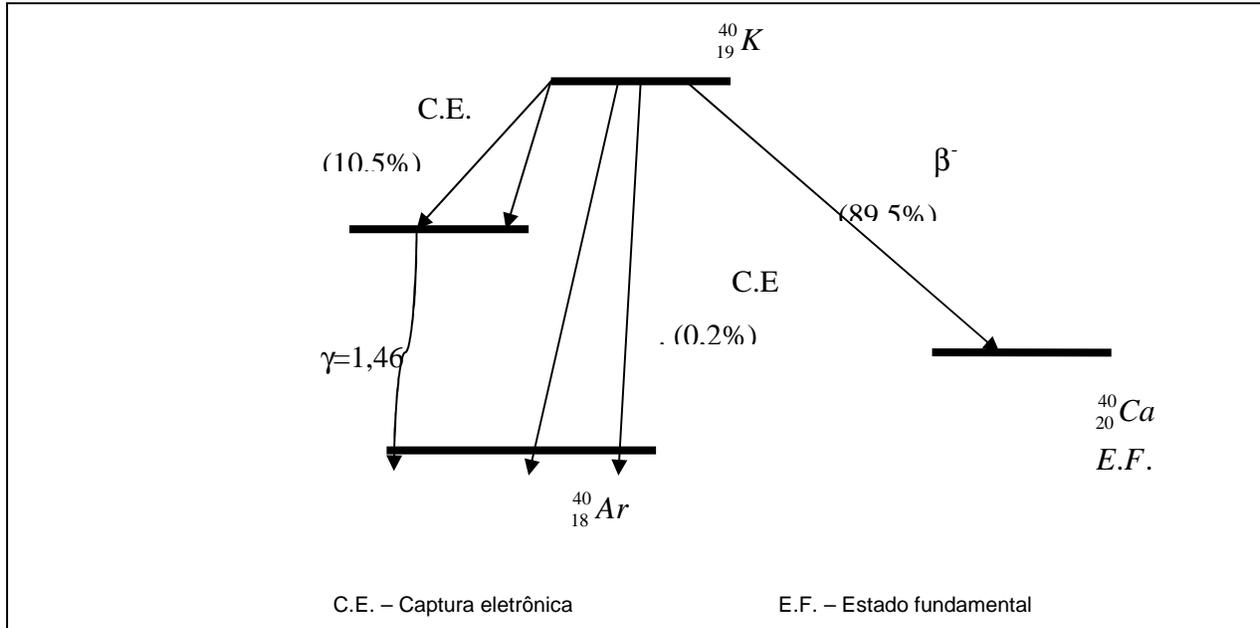


Figura 2.1 - Esquema de decaimento do  $^{40}\text{K}$  (KAPLAN, 1978).

Alguns isótopos ao decaírem produzem novos isótopos. Por exemplo, o  $^{238}_{92}\text{U}$  decai por emissão alfa para o  $^{232}_{90}\text{Th}$ . Esse isótopo de Tório por sua vez emite uma partícula  $\beta^-$  e transmuta para o isótopo  $^{234}_{91}\text{Pa}$  do Protactínio, que também é radioativo. Quando ocorre uma seqüência de decaimentos em seqüência, tem-se uma série radioativa. O  $^{238}_{92}\text{U}$  é o pai de uma série radioativa natural que acaba produzindo, depois da emissão de 8 partículas alfa e 6 partículas beta, o isótopo  $^{206}_{82}\text{Pb}$  que é estável (KAPLAN, 1978).

Existem mais duas séries radioativas naturais. Aquela que se inicia com o isótopo  $^{232}_{90}\text{Th}$  e termina com o isótopo  $^{208}_{82}\text{Pb}$ , conhecida como série do Tório e aquela se inicia com o isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$  e termina com o isótopo  $^{207}_{82}\text{Pb}$ . Essa última série recebe, por razões históricas, o nome de série do Actínio.

As fontes de radiação gama natural podem ser divididas em 3 grupos (MINTY, 1997):

- o Isótopos originais:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ;

- isótopos originados do decaimento do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ;
- isótopos criados por fenômenos externos, como interação dos raios cósmicos com a Terra e a atmosfera.

### 2.2 – Gamaespectrometria

Gamaespectrometria é um método de medição de isótopos, que determina a energia e taxa de contagem de raios gamas emitidos por elementos radioativos. Os elementos radioativos ocorrem sem intervenção alguma na natureza e produzem radiação gama de energia que acabam por interagir com o meio ambiente.

Um dos motivos de trabalharmos com a radiação gama é o seu poder de penetração, já que a partícula alfa é facilmente barrada por uma folha de papel, a partícula beta é barrada por alguns centímetros de alumínio e o raio gama necessita de vários centímetros de concreto para ser barrado.

Outro motivo é a determinação de energia, como vimos no exemplo da Figura 2-1, o elemento  $^{40}\text{K}$  emite em 10,5% das desintegrações uma energia específica de 1,46 MeV, daí podemos detectar a intensidade desta energia que está relacionada com o elemento  $^{40}\text{K}$ .

A radiação gama interage com a matéria, e através de detectores especiais, conseguimos medir a energia de cada raio gama incidente neste detector. Com um equipamento interligado neste detector conseguimos obter o espectro de energia, que é a contagem durante um determinado tempo para cada energia.

#### 2.2.1 - Interação dos raios gama com a matéria

Os três principais processos de interação da radiação gama com a matéria são:

Efeito fotoelétrico: O fóton de radiação gama incidente remove um elétron das camadas mais internas do átomo (camada K ou L). A energia do fóton incidente é totalmente absorvida no processo como energia cinética.

Efeito Compton: O fóton de radiação gama interage com elétrons das camadas mais externas do átomo que possuem energia de ligação muito inferior à sua. A radiação gama incidente desloca o elétron cedendo parte de sua energia. A energia do fóton não é totalmente

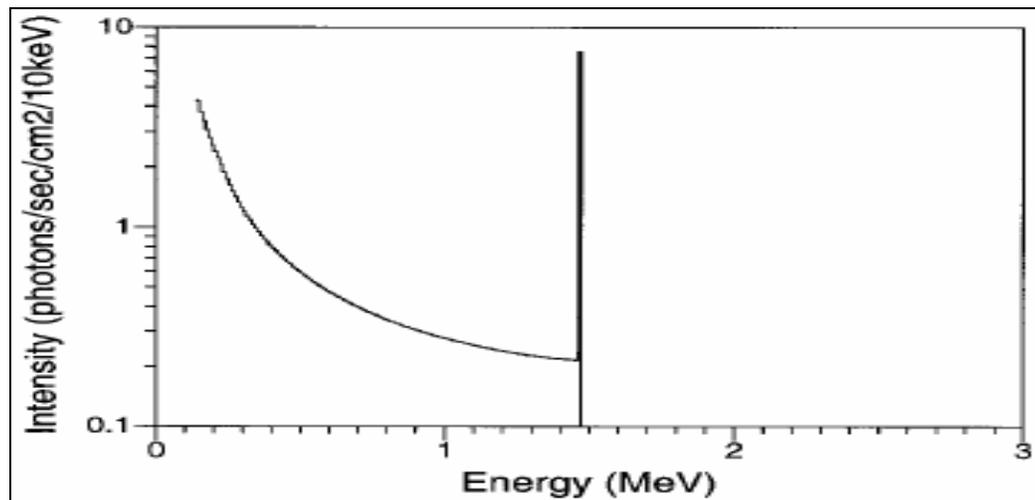
absorvida e produz a emissão de um fóton gama cuja energia é a diferença entre a energia do fóton incidente menos a energia absorvida.

Produção de Pares: Ocorre quando a energia do fóton incidente é superior a 1,022MeV. Nesse processo, a radiação gama é absorvida na proximidade de um núcleo dando origem a um par elétron-pósitron, tendo cada elétron-pósitron a energia de 511keV (GILMORE, 1995).

### 2.2.2 - Espectro de Energia

Os isótopos gama emissores emitem radiação com energias bem definidas. No caso do  $^{40}\text{K}$ , por exemplo, a energia de radiação gama emitida é de 1460keV. Outros isótopos podem emitir mais de uma radiação gama, cada qual com sua energia característica.

O espectro de energia é o resultado medido pelo gamaespectrômetro e indica o número de fótons incidentes durante um determinado período de tempo, para diferentes energias definidas. Com isto podemos verificar a concentração de Potássio em um ambiente conforme a intensidade da energia de 1460keV como visto na Figura 2.2.



**Figura 2.2** - Simulação do fluxo de raios gama do Potássio (MINTY, 1997).

O espectro de emissão de um isótopo gama emissor, em teoria, tem o aspecto de um espectro de linhas, cada uma caracterizada por uma energia bem definida. No espectro da Figura 2.2 podemos determinar a intensidade de Potássio em um ambiente conforme a intensidade da energia de 1460keV.

Qualquer que seja o tipo de detector utilizado, parte dos fótons é totalmente absorvida por efeito fotoelétrico e parte sofre espalhamento Compton. Além disso, se a energia do fóton for

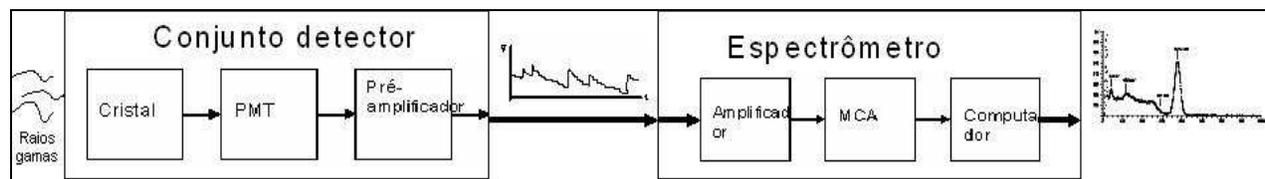
superior a 1022keV, existe a possibilidade de ocorrer produção de pares, que nem sempre deposita toda energia do fóton sobre o detector.

### 2.3 - Gamaespectrômetro

O gamaespectrômetro é formado por todo equipamento utilizado na transformação de radiação gama em espectros de contagem de energia. É composto por detectores capazes de converter fótons de radiação em sinais elétricos e equipamentos capazes de converter estes sinais elétricos em espectros de energia em um determinado período de tempo.

Existem dois tipos de cristais detectores de raios gama: cristais do tipo cintilador e semicondutor. O cristal do tipo semicondutor, usualmente de Germânio, tem uma resolução muito maior que o cristal cintilador, mas é usado somente em laboratório pelo alto custo e pela necessidade de mantê-lo em temperaturas baixas através de nitrogênio líquido (GILMORE, 1995). A seguir descreveremos o princípio de funcionamento de gamaespectrômetros com o uso de cristais cintiladores, que foi utilizado no projeto Tapajós e normalmente utilizados nos aerolevantamentos.

A Figura 2.3 mostra um diagrama do fluxo de sinais no espectrômetro nuclear. O conjunto de cristais converte a energia da radiação dos fótons em sinais elétricos e o espectrômetro de raios gama converte estes mesmos sinais em contagens de elementos e espectro de energia durante um determinado período.



**Figura 2.3** - Diagrama do fluxo de sinais no espectrômetro nuclear. NaI(Tl): cristal cintilador; PMT: tubo fotomultiplicador; Pré-Amp: pré-amplificador; Amp: amplificador; MCA: analisador multicanal; Comp: computador (SILVA, 2002).

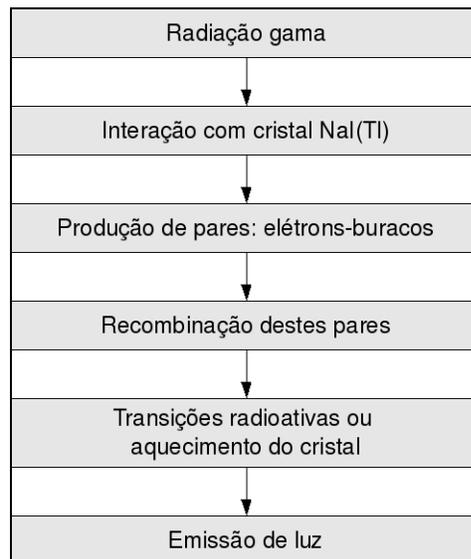
A funcionalidade básica destes blocos é converter sinais de entrada em sinais desejados na saída. A Tabela 2.1 descreve a funcionalidade de cada bloco.

**Tabela 2.1 - Funcionalidade de cada bloco do espectrômetro nuclear.**

<b>Bloco</b>	<b>Entrada/Saída</b>	<b>Descrição</b>
Cristal cintilador	raios gama/luz	converte o fóton da radiação em luz
Tubo fotomultiplicador	Luz/corrente	converte em corrente a luz incidente do cristal
Pré-amplificador	Corrente/tensão	amplifica o sinal de saída do foto-tubo
Amplificador	Tensão/pulsos	gera pulsos individuais para cada fóton proporcional à energia
Analizador multicanal	pulsos/espectro	Realiza a contagem de energia incidente no canal correspondente
Computador	espectro/contagem	processo estatístico e correções de dados

#### 2.4 - Cristais Detectores de cintilação

Os materiais cintiladores como NaI(Tl) – Iodeto de Sódio ativado com Tálcio - são utilizados para converter fótons de radiação em sinal luminoso. A Figura 2.4 mostra um resumo da seqüência de eventos que ocorrem dentro do cristal cintilador (LEO, 1994).



**Figura 2.4 - Eventos ocorridos no cristal cintilador até a emissão de luz captada pela fotomultiplicadora (LEO, 1994).**

Os fótons emitidos estão em uma região visível do espectro eletromagnético.

---

## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Para cintilações do NaI(Tl), o intervalo de comprimento de onda está centrado em 415nm. Sem o ativador - no caso do iodeto de sódio o ativador é o tálio - o cristal produziria fótons longe da faixa visível o que tornaria a detecção de luz difícil e o próprio material absorveria os fótons emitidos antes deles chegarem à fotomultiplicadora.

A eficiência do cristal em relação à energia absorvida com a energia do fóton incidente está relacionada com diversas características suas, tais como dimensão e blindagem, entre outras.

Recordando os fundamentos da radiação gama, existem três tipos de interações de raios gama com o cristal: Efeito fotoelétrico que absorve toda a energia do fóton; Efeito espalhamento Compton que absorve parte da energia do fóton; Efeito produção de pares que absorve parte da energia e produz dois novos fótons de energia 511keV cada (Figura 2.5).

Pode-se ver na Figura 2.6 que o tipo de material influencia na probabilidade de ocorrência de cada tipo de interação em função da energia. Efeitos fotoelétricos usualmente ocorrem em energias baixas e efeitos de produção de pares ocorrem em energias altas. Como a maioria dos materiais objeto de medidas aerogamaespectrométricas possui um número atômico ( $Z$ ) baixo (entre 10 e 20), e também a maioria da radiação gama é de baixa a média energia (menor do que 2,62 MeV), o espalhamento Compton é o processo predominante entre a fonte de radioatividade e o detector.

Além da eficiência do detector, também levamos em consideração sua resolução. A resolução do detector corresponde ao erro de leitura da energia absorvida por ele. Os três principais fatores que afetam a resolução são: produção de cargas no cristal, detecção de cargas na fotomultiplicadora e ruído eletrônico na detecção de pulsos.

A energia necessária pra produzir um fotoelétron no foto-cátodo da fotomultiplicadora é 170eV. O desvio padrão da produção destas cargas é a raiz quadrada do número de cargas,  $\sigma = \sqrt{n}$ . Nota-se, então, que quanto maior o número de cargas, menor será o desvio padrão em relação ao número de cargas. O resultado da ativação NaI é um cristal que converte aproximadamente 12% de sua energia dos gamas incidentes em fótons de luz através. Com isto podemos estimar a resolução,  $R = \frac{\sqrt{n}}{n} \times 100$ , para uma energia de 1332.5keV é de 7,28% (LEO, 1994).

---

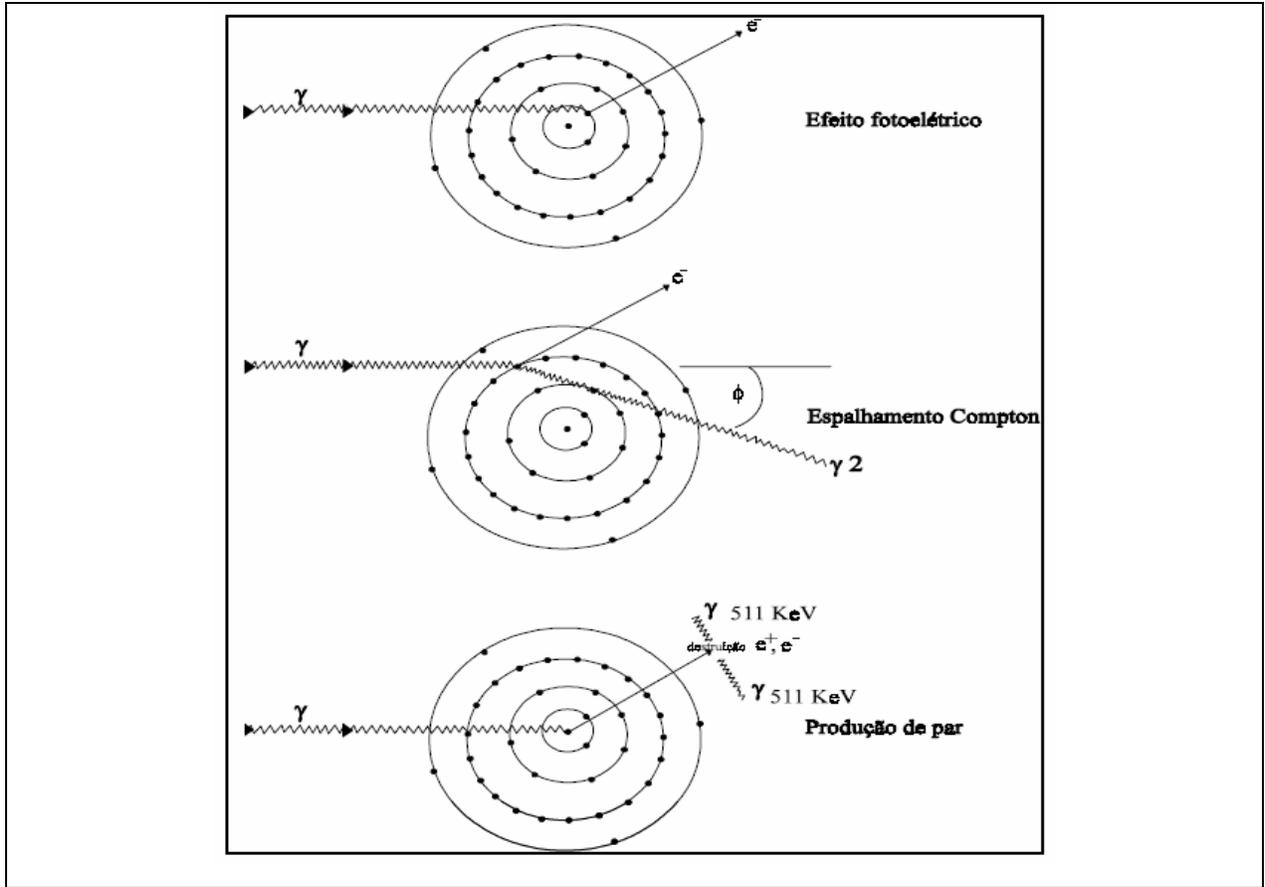


Figura 2.5 - Diagrama esquemático das interações da radiação gama com a matéria (KAPLAN, 1978).

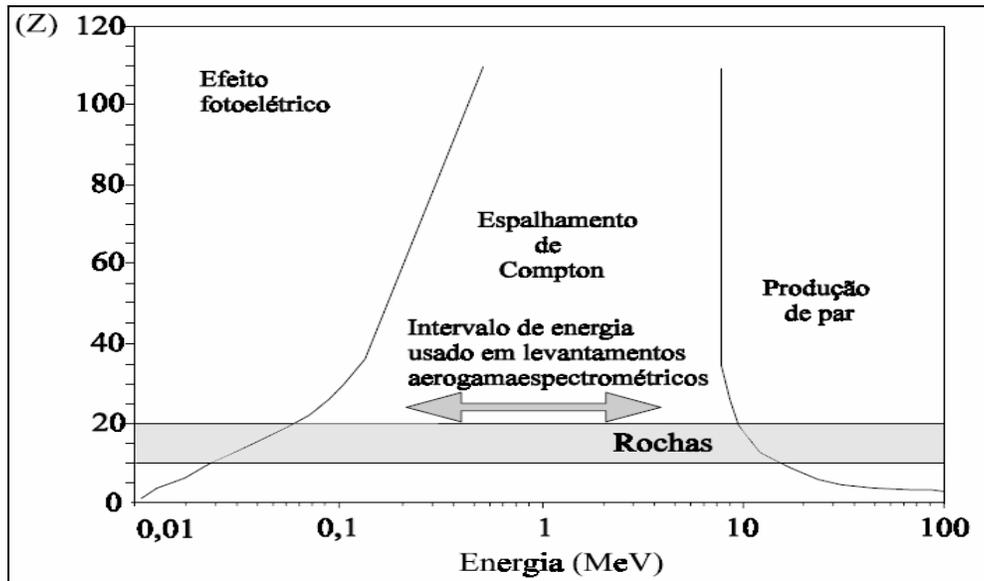


Figura 2.6 - Interações da radiação gama com a matéria (MINTY, 1997).

No caso do cristal semicondutor de Germânio que possui outras características e necessidade de 2,96eV para produção de uma carga, a incerteza é de 0,218% para a mesma energia (fator de 0.03 em relação a NaI) (LEO, 1994).

Ruídos eletrônicos são incertezas que interferem no sinal processado pelo pré-amplificador, amplificador e analisador multicanal. Tais ruídos são variações pequenas no sinal que não são geradas pela fonte; neste caso seria a energia detectada do detector. A amplitude dos ruídos costuma ser bem menor que a amplitude do sinal que se deseja ler, tendo uma incerteza pequena em relação às citadas anteriormente. Atualmente existem filtros modernos que eliminam grande parte dos ruídos em detectores de pulsos digitais.

A excitação do ativador decai exponencialmente com o tempo devido ao efeito de luminescência. A meia-vida do estado do ativador excitado é muito curto, em torno de 230 ns para cristal de NaI(Tl). Isto ocorre devido à transição do estado excitado para o estado normal do elétron. No elétron encontrado em um destes estados pode primeiro ocorrer excitação térmica para um nível que não é esquecido antes de ser des-excitado, o que torna a meia-vida destas excitações mais longas que as normais. O decaimento lento proporcional da luz emitida por estas des-excitações longas é chamado de fosforescência. Em cristais NaI(Tl), por exemplo, onde a meia-vida da cintilação primária é 230 ns, 9% da luz total é emitida como fosforescência com um tempo de decaimento de 150 ms.

### **2.5 - Gamaespectrometria Aplicada em Aerolevanteamento**

Um dos fatos mais importantes a ser considerado, em relação à radioatividade natural, é que ela não é influenciada por mudanças químicas ou por quaisquer mudanças normais no ambiente do material na qual ocorre. A radioatividade é muito diferente de qualquer reação que se possa obter por aquecimento, por exemplo, ou por qualquer outra forma de reação química. A radiação é encontrada em qualquer lugar do planeta.

Toda a radiação gama detectável dos materiais da terra, rocha e solo, vêm basicamente do decaimento de três elementos: Urânio (U), Tório (Th) e Potássio (K) (TELFORD, 2001).

As mudanças na concentração de K, U e Th acompanham as principais mudanças da litologia, sendo a gamaespectrometria usada como uma ferramenta geológica de reconhecimento

---

de muitas áreas, como detecção de depósitos minerais, estudo de áreas potenciais para armazenamento de gás e petróleo (URQUART, 2008).

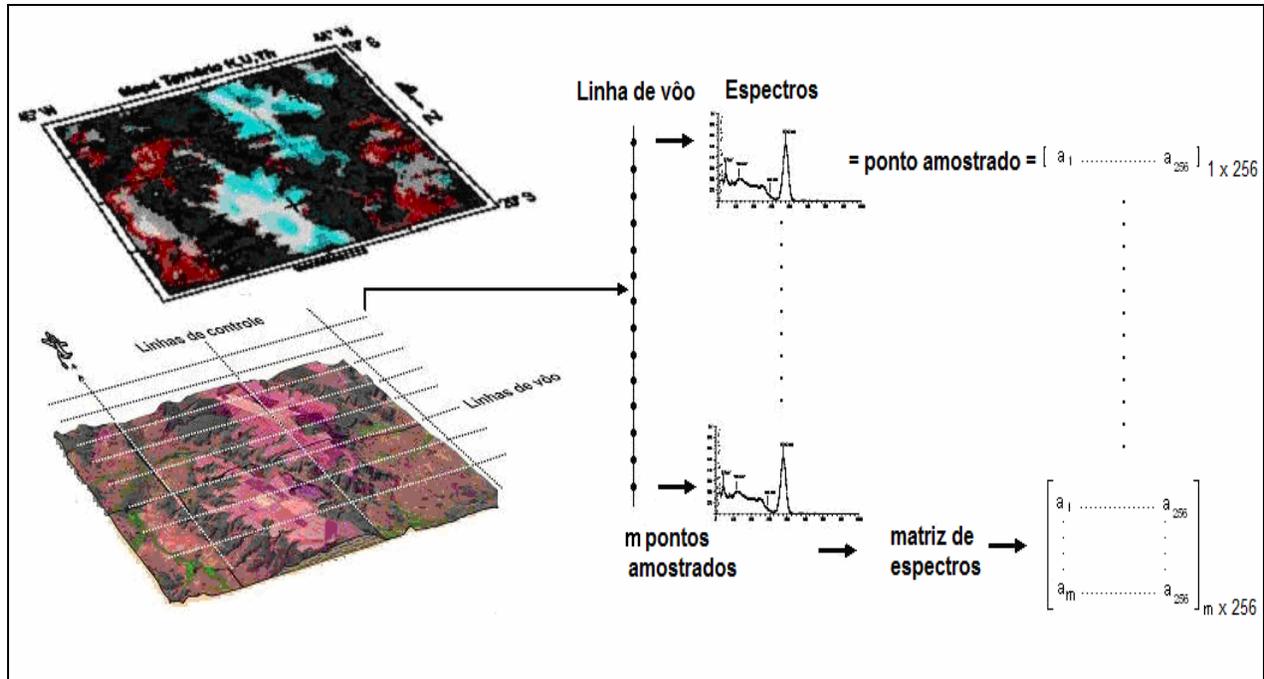
As mudanças na concentração dos três elementos citados acompanham as principais mudanças da litologia, podendo este método traçar um reconhecimento geológico em muitas áreas, por indicar processos geológicos preliminares como ação de soluções mineralizadoras ou processos metamórficos.

As aplicações principais de levantamentos de dados gamaespectrométricos são (URQUART, 2008):

- Mapeamento geológico como uma ferramenta indireta para exploração de minerais econômicos.
- Exploração dos depósitos de Urânio.
- Aplicações especiais tais como a exploração para diamantes ajudando no reconhecimento da localização do kimberlito.
- Exploração dos depósitos de Cobre onde a alteração de Potássio causa um aumento na assinatura radiométrica do mapa.
- Exploração do Ouro usando a associação de Au-U.

### 2.6 - Coleta de dados gamaespectrométricos em aerolevantamentos

Em aerolevantamentos os dados são coletados num gamaespectrômetro a bordo de um avião, que sobrevoa linhas definidas numa malha com espaçamento específico. Em cada linha de vôo são feitas leituras com determinada frequência, isto é, uma leitura a cada intervalo de tempo (Figura 2.7). A cada ponto de leitura o gamaespectrômetro registra um conjunto de medidas de energia, o espectro: vetor cuja quantidade de elementos varia de acordo com a resolução do equipamento utilizado – 256, 512 ou 1024 canais. Ao final da linha de vôo o equipamento terá realizado um conjunto de  $m$  pontos amostrados, dependendo do tamanho da linha. Este conjunto pode ser representado como uma matriz de espectros ( $M_{\text{original}}$ ). Esta matriz é a representação dos valores medidos de energia em cada canal nos  $n$  pontos amostrados.



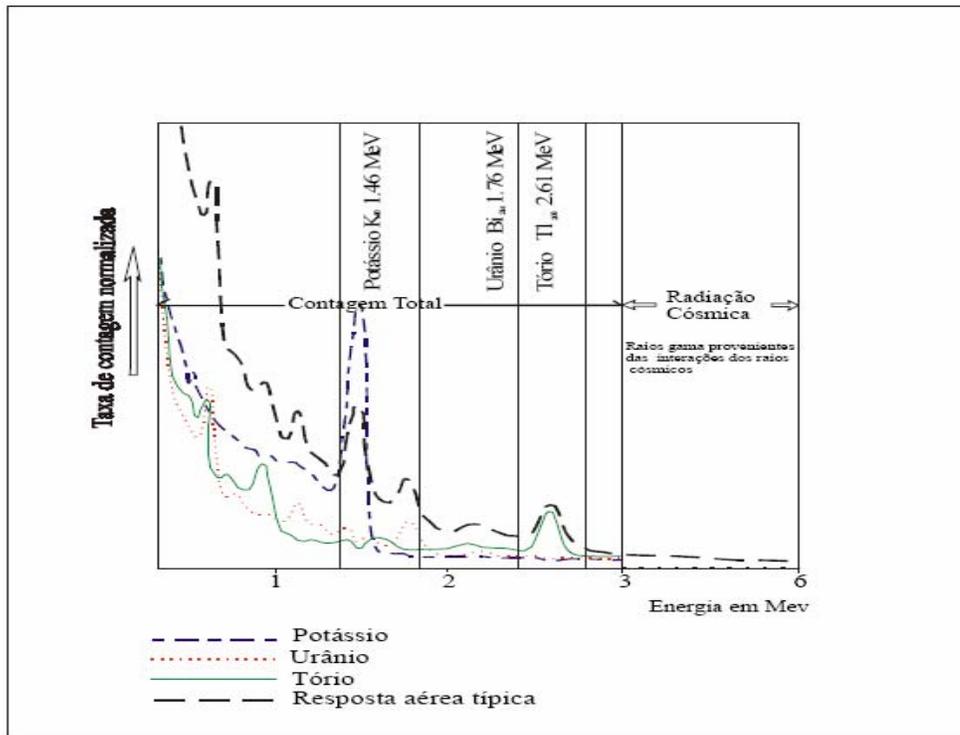
**Figura 2.7** - Diagrama ilustrativo dos pontos amostrados em uma linha de voo e sua respectiva matriz de espectros ( $M_{original}$ ).

### 2.7 - Seleção das janelas energéticas do U, Th e K

De todo o espectro só há interesse em três intervalos (janelas) de energia: Urânio, Tório e Potássio. Estes intervalos (janelas) são definidos de acordo com a *International Atomic Energy Association* - IAEA (1991). A tabela 2.2 e a Figura 2.8 mostram as janelas padrões para mapeamento de radioelementos. A partir destas janelas é realizado o processamento dos dados coletados - uma série de correções necessárias para que possam ser gerados os produtos finais do aerolevantamento de forma confiável.

**Tabela 2.2 - Janelas padrão utilizadas em aerolevantamentos (IAEA, 1991).**

Janela	Isótopos	Energia (MeV)
Contagem Total	-	0,400 - 2,810
Potássio	$^{40}\text{K}$ (1,460 MeV)	1,370 - 1,570
Urânio	$^{214}\text{Bi}$ (1,765 MeV)	1,660 - 1860
Tório	$^{208}\text{Tl}$ (2,614 MeV)	2,410 - 2,810



**Figura 2.8** - Janelas padrões utilizadas em aerolevantamentos gamaespectrométricos (IAEA, 1991).

## 2.8 - Processamento de dados

O método de gamaespectrometria considera muitas variáveis necessárias para reduzir os dados observados a um formulário que seja útil para a interpretação geológica. Normalmente, os dados de interpretação são obtidos do espectro de contagem de energia, através de correções para informar apenas a concentração dos elementos K, U e Th na crosta terrestre, especificadas abaixo (IAEA, 1991):

**Contagem de Janelas:** É obtida a contagem bruta diretamente do espectro de energia, contagem dos elementos K, U e Th, contagem total e também a contagem cômica, para energias acima de 3 MeV.

**Tempo Morto (*deadtime*):** É o tempo necessário para o espectrômetro processar fótons individuais, não podendo reconhecer novos fótons incidentes. Nos espectrômetros mais modernos, o tempo morto é considerado nulo pela alta velocidade dos processadores atuais.

**Correção de fundo (*background*):** Elimina a radiação da aeronave e a radiação cósmica. A radiação de fundo influencia nas janelas de contagens dos elementos através do espalhamento Compton, absorvendo parte da energia.

**Compton (*Stripping*):** Corrige a influência que a contagem da janela de um elemento incide na contagem dos outros dois. Como exemplo, o Urânio pode influenciar na contagem de Potássio através do espalhamento Compton (absorvendo energia menor) ou na contagem do Tório através do efeito *pile-up* (absorvendo energia maior, por sobreposição de dois picos).

**Correção da altitude:** A taxa de contagem da radiação proveniente do solo decai exponencialmente com a altitude do detector em relação ao solo, por causa da atenuação dos raios gamas com a atmosfera. Para levantamento em diferentes alturas é necessário nivelar todos os dados em uma mesma altura de referência.

**Cálculo da Concentração:** Através de constantes de sensibilidade determinada experimentalmente na calibração do equipamento é possível converter, após todas as correções acima, a relação de contagens por um período determinado em concentrações de elementos nas rochas e solos. A unidade de medida da concentração é porcentagem para Potássio e em partes por milhões (p.p.m.) para Urânio e Tório. Na Figura 2.9 pode-se observar a relação dos três tipos de elementos estudados para cada tipo de geologia.

Além das correções descritas, é comum a utilização de outros processos tais como nivelamento, micronivelamento e cálculo de razões os quais não foram aplicados neste trabalho.

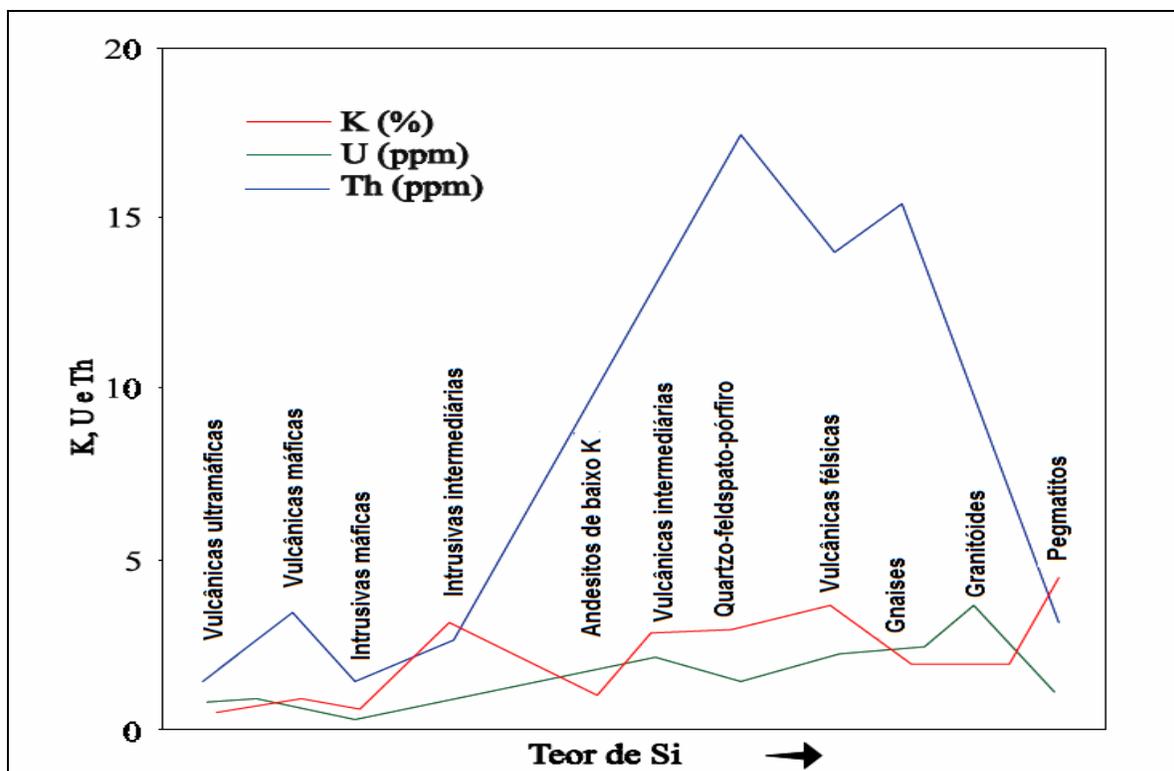


Figura 2.9 - Variação média de K, U & Th para determinadas rochas (DICKSON & SCOTT, 1997).

### CAPÍTULO III - OS MÉTODOS NASVD E MNF

#### 3 - OS MÉTODOS NASVD E MNF

Após o processamento dos dados, cuja etapa é relativamente demorada e complexa pois depende muito da experiência (*feeling*) do processador, observa-se que o ruído nos dados persiste, influenciando diretamente, de forma negativa na qualidade final dos produtos. Há vários tipos de filtros que podem ser aplicados com a finalidade de atenuar este ruído, mas a maioria deles não tem resultados satisfatórios, pois não levam em conta a natureza estatística do decaimento radioativo. O caminho natural é o uso de Análise de Componentes Principais - ACP - que trabalha com conjunto de dados multivariados, como é o caso dos dados coletados em gamaespectrometria. A ACP considera os espectros como uma combinação linear de componentes espectrais, sendo este um conceito muito utilizado em gamaespectrometria.

Os métodos NASVD (*Noise-Adjusted Singular Value Decomposition*) e MNF (*Maximum Noise Fraction*) são derivados e análogos à transformação por Análise de Componentes Principais diferenciando um do outro apenas na forma de normalização dos espectros. Deste modo, antes destes dois métodos serem apresentados, é interessante fazer uma breve discussão sobre ACP.

#### 3.1 - A natureza do ruído em gamaespectrometria

O ruído nos dados aerogamaespectrométricos deriva, em grande parte, da natureza estatística do decaimento radioativo. O número médio de desintegração de um isótopo radiativo particular, durante um intervalo de amostragem fixo, é proporcional à concentração do isótopo no terreno. Mas como toda desintegração é um evento aleatório, o número de eventos registrados, durante um intervalo particular de amostragem, será diferente da média. Cada desintegração atômica durante o decaimento radiativo ocorre completamente independente de todos os outros decaimentos. Isto significa que o número de decaimentos radioativos, e, portanto o número de raios gama medido de um isótopo num intervalo particular de tempo, segue uma importante propriedade da distribuição de Poisson (Seção 3.11.1): o desvio padrão é igual à raiz quadrada da razão de contagem média ( $\sigma = \sqrt{n}$ ). Esta relação fornece um conveniente meio para estimar o erro em gamaespectrometria, onde se assume que todos os erros são devidos à natureza aleatória

do decaimento radioativo, e a variância ser, aproximadamente, igual ao número de contagens observadas (GILMORE, 1995). Resumindo:

- A variância é igual à média. Se existir uma boa estimativa da média da razão de contagem para um particular canal, então, pode-se ter uma boa estimativa da variância do erro para este canal.
- Não há nenhuma correlação entre o ruído (considerado o erro estatístico da medida, contagem, devido à distribuição de Poisson das emissões) dos canais de contagem em gamaespectrometria. Isto se deve ao fato de que a desintegração radiativa ocorre através de eventos independentes, e um simples raio gama pode ser registrado somente em um canal.

### 3.2 - Análise dos Componentes Principais - ACP

Dado um conjunto de  $m$  vetores de dados (organizados na forma de uma matriz), a idéia básica consiste em achar uma transformação linear que cumpra uma exigência. A premissa mais importante do método ACP é que se considera que o sinal, ou informação contida no dado, é aquela que tem maior variância, ao contrário do ruído que possui (por hipótese) menor variância.

Pode-se mostrar que essa transformação é uma rotação (NOBLE, 1977) de modo que se preserva a distância entre os dados. Além disso, este novo conjunto de vetores transformados fica indexado na ordem decrescente de variância. Isto mostra quais dados têm maior influência sobre o conjunto, segundo o critério de maior variância.

Sua aplicação mais óbvia é a compressão de dados, isto é, tendo um conjunto grande de dados, pode-se descobrir, após a transformação, as direções mais importantes, projetar os dados originais nestas direções encontradas e aplicar a transformação inversa para as direções originais. Desta forma, reduz-se consideravelmente o número de variáveis, havendo perdas de informações, mas de forma minimizada, ficando as informações (sinal) concentradas, fato que simplifica a análise deste conjunto de dados.

Desta forma, considere um conjunto “A” de  $m$  espectros da mesma fonte (Figura 2.7) com 256 canais (poderia ser 512 ou 1024 canais, dependendo da resolução do equipamento), as principais componentes deste conjunto  $A$  ( $m \times 256$ ) (onde  $m \geq 256$ ) de  $m$  espectros são os autovetores da matriz de covariância  $cov(A)$ . Este tipo de análise produz 256 autovetores,

---

correspondentes às Principais Componentes e 256 autovalores - medida da contribuição que cada um destes autovetores em relação ao conjunto de entrada  $A$ . Eles são as variâncias de cada autovetor, e somados resultam na variação total no espectro.

Um espectro observado pode ser reconstruído pelos autovetores, multiplicando cada autovetor com uma apropriada amplitude e somando estes produtos. Em notação matricial:

$$A = CV,$$

onde  $A_{(m \times 256)}$  é o espectro de entrada,  $C_{(m \times 256)}$  é a concentração (amplitude) e  $V_{(256 \times 256)}$  é a matriz com os componentes principais (autovetores).

Assim, a ACP pode ser usada para remover o ruído de espectros multicanais se o sinal for fortemente correlacionado dentro do espectro de entrada e o ruído não. Isto é possível porque o sinal concentra-se, em sua maior parte, nas componentes de baixa ordem. O ruído por sua vez não tem uma boa correlação entre os canais razão de contagem, tendendo a espalhar-se por todas as componentes. Então, pode-se remover uma grande parte do ruído reconstruindo o espectro “suavizado” com algumas componentes de baixa ordem.

Para exemplificar, na Figura 3.1, estão representados os autovalores em relação às amplitudes de uma ACP aplicada a um voo teste. Observam-se as grandes amplitudes concentradas nos primeiros autovalores e que elas tendem, de maneira lenta, para baixos valores, isto é, o sinal persiste nas componentes restantes.

Todavia, verificando um espectro típico gamaespectrométrico (Figura 3.2) nota-se que os canais de baixas energias têm razão de contagem superior muitas vezes maior que os canais de altas energias. Isto significa que estes canais de baixas energias dominam completamente a ACP. Não há nada de errado nisto, uma vez que os canais (variáveis) são todos expressos na mesma unidade (*counts/s*). O problema é que os canais de baixas energias possuem maior variância do erro em relação aos canais de altas energias. Isto significa que o ruído, em alguns canais, terá maior peso na ACP que o sinal em outros. Uma saída para resolver este problema é normalizar o ruído em todos os canais, igualando os pesos do mesmo no espectro.

Numa primeira aproximação, pode-se assumir que a variância do erro do canal razão de contagem é a média da razão de contagem para este canal dentro do espectro de entrada (bruto). Assim, se para um determinado canal a média da razão de contagem é  $n$ , então, pode-se normalizar este canal em cada espectro pela divisão do canal da razão de contagem por  $\sqrt{n}^{-1}$ . A Figura 3.3 mostra a mesma ACP, do mesmo vôo teste mostrada na Figura 3.1, onde foi aplicada uma normalização ao espectro de entrada. Observa-se que os autovalores tendem rapidamente para um patamar próximo a zero, que representa as componentes que contêm essencialmente ruídos. Com a normalização aplicada ao espectro de entrada e a variância do erro unitário, as amplitudes do ruído das componentes devem ser as mesmas, aproximadamente.

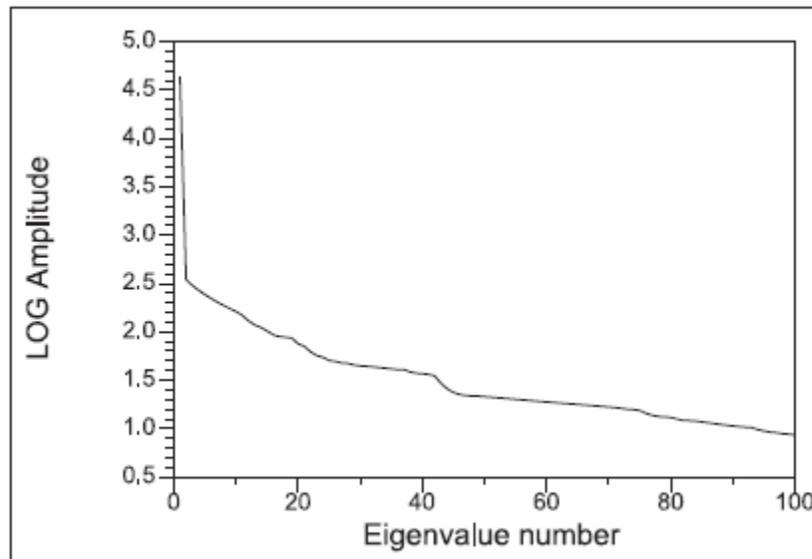


Figura 3.1 - Curva que representa os autovalores de uma ACP sem nenhum tipo de normalização (MINTY, 2000).

---

1- Porque dividir por  $\sqrt{n}$  e não por  $n$  ?

Se uma variável aleatória  $x$  tem uma variância de  $\text{var}(x)$ , então a variância da função:  $y = f(x) = \frac{x}{a}$ , onde  $a$  é uma constante, é dada por  $\text{var}(y) = \frac{\text{var}(x)}{a^2}$ . Desta segue que se a função tem uma variância  $n$ , e se este for dividido por  $\sqrt{n}$ , então  $\text{var}(f) = 1$  (GILMORE, 1995).

---

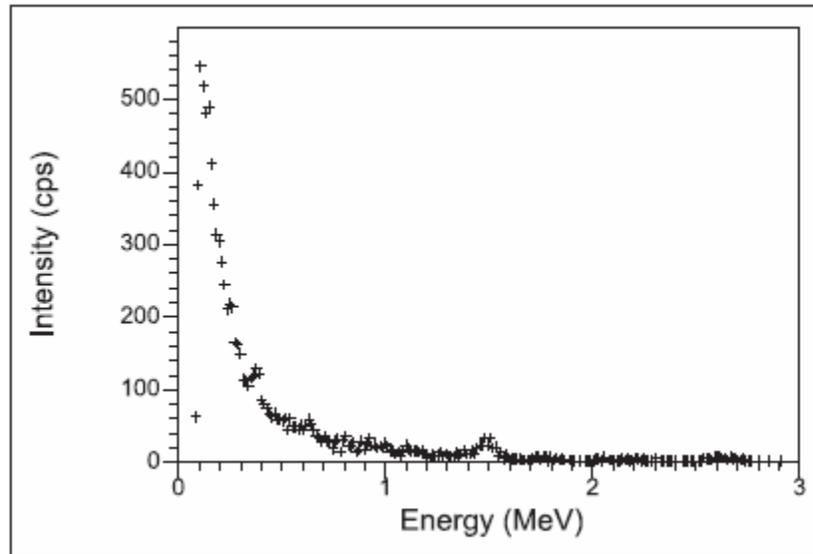


Figura 3.2 - Espectro típico utilizado em gamaespectrometria (MINTY, 2000).

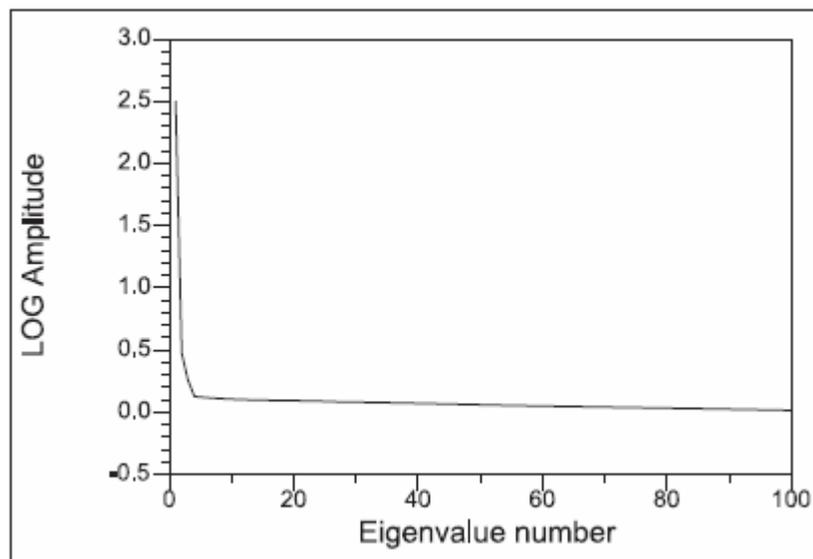


Figura 3.3 - Curva que representa os autovalores de uma ACP depois de normalizado (MINTY, 2000).

Neste ponto é que os métodos NASVD e MNF atuam, pois, ambos fazem essencialmente uma ACP dos espectros brutos. A principal diferença entre eles é como eles normalizam os espectros brutos em relação ao ruído. Os dois métodos serão apresentados em seguida.

### 3.3 - O Método NASVD

O método NASVD (*Noise-Adjusted Singular Value Decomposition*) é uma técnica elaborada para remover ruído de dados gamaespectrométricos brutos usando a análise de componentes espectrais. As componentes de ordem inferior são interpretadas como sinal, e as de ordem superior como ruído, sendo estas últimas desprezadas. A partir deste ponto, reconstrói-se o espectro original somente com os componentes de ordem inferior. O procedimento NASVD baseia-se na análise estatística multivariada para extrair o espectro dominante dos dados brutos. O caminho mais eficaz para isto é usar componentes ortogonais, pois simplifica os cálculos matriciais (NOBLE, 1977).

Como já discutido, os autovalores são as variâncias associadas com cada componente principal. O espectro observado pode ser representado como uma combinação linear das componentes principais:

$$A = CV, \quad (3.1)$$

onde  $A_{(m \times 256)}$  é o espectro de entrada,  $C_{(m \times 256)}$  é a concentração (amplitude) e  $V_{(256 \times 256)}$  é a matriz com os componentes principais (autovetores).

De acordo com o que foi apresentado na Seção 2, deste capítulo, há dois aspectos associados ao uso da ACP para espectros multicanais que devem ser observados:

1 - a variância associada a cada canal deve ser a mesma, isto é, normalização do espectro de entrada para variância unitária em cada canal. Hovgaard (1997a, 1997b) sugeriu uma solução simples: como a variância de um canal razão de contagem é a mesma, assim como a razão de contagem média para este mesmo canal, o melhor ajuste do espectro médio para cada espectro de entrada dá uma boa estimativa da razão de contagem média (e, portanto, da variância) para cada canal. Assim, o espectro de entrada é escalonado para uma variância unitária em cada canal pela divisão destes pela raiz quadrada do melhor ajuste do espectro médio para cada um dos espectros de entrada. Isto é,

**Ajuste do ruído (NA – Noise adjusted)**

$$\mathbf{Sum}(i) \text{ (= a contagem Total)} = \sum_{j=1}^m A(i, j),$$

onde  $m$  = total de espectros em uma linha de vôo,

$j = 1, \dots, \# \text{ canais}$ ,

$i$  = espectro #;

**Espectro Normalizado:**  $S(i, k) = \frac{A(i, k)}{\mathbf{Sum}(i)}$  , onde  $k = 1 \dots \# \text{ canais}$ ;

$$SN(i) = \sum_{k=1}^m S(i, k)$$

$$SN(k) = \sum_{i=1}^m S(i, k) = \text{N}^\circ \text{ de pontos amostrados} = \text{N}^\circ \text{ de linhas da matriz de entrada};$$

**Espectro Representativo Normalizado;**  $ST_k(k) = \frac{SN(k)}{\sum_{i=1}^m SN(i)}$

**Espectro com Ruído Ajustado:**

$$A_{\text{new}}(i, j) = A(i, j) * \frac{1}{\sqrt{ST_k(j) * \mathbf{Sum}(i)}} \quad (3.2)$$

onde:

$$\text{Filtro}_{NA} = \frac{1}{\sqrt{ST_k(j) * \mathbf{Sum}(i)}} \quad (3.3)$$

2 - A ACP requer que os dados estejam centrados na média para que se obtenham melhores resultados. Para tanto é necessário aplicar a decomposição SVD (ver Seção 8.3) que analisa a dispersão dos dados de forma mais eficaz que a média simples.

O espectro com ruído ajustado,  $A_{\text{new}}$ , é o elemento de entrada do algoritmo SVD.

Qualquer matriz  $A_{(m \times n)}$ , onde  $m \geq n$ , pode ser reescrita como produto de três matrizes domínio (NOBLE, 1977):

$$A = U \Sigma V^T, \quad (3.4)$$

onde:  $U$  ( $m_{\text{espectros}} \times n_{\text{canais}}$ ) é uma matriz de coeficientes,  $\Sigma$  ( $n \times n$ ) é matriz diagonal de valores singulares, os autovalores, ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n > 0$ ),  $V^T$  ( $n \times n$ ) é a matriz dos autovetores, que são as componentes espectrais dos dados.

Os autovetores de  $A^T A$  são as colunas de  $V$  (ortogonal) e os autovalores são os quadrados dos elementos da diagonal de  $\Sigma$ . A equação (3.4) é usada para calcular os autovetores ( $V$ ) e amplitudes ( $U\Sigma$ ) de  $A$ . Os autovetores são re-escalados multiplicando pela soma das contagens em cada espectro de entrada. As primeiras componentes de  $\Sigma$  e  $V$  contêm a maior parte do sinal. Portanto, o ruído é removido reconstruindo o espectro com autovetores e amplitudes de baixas ordens.

Por exemplo, a Figura 3.4 mostra 6 componentes principais de um levantamento. A componente principal 1 representa o espectro médio. Componentes 2 a 5 mostram um sinal no canal 55 devido ao  $\text{Cs}^{137}$ . O sinal entre o canal 109-125 se deve ao Potássio. A componente principal 4 mostra um sinal no intervalo de energia do Tório entre os canais 189 e 220. A componente principal 6 é dominada por sinal incoerente e representa, quase em sua totalidade, o ruído. Então, 5 componentes, provavelmente, são suficientes para reconstrução do sinal, neste caso.

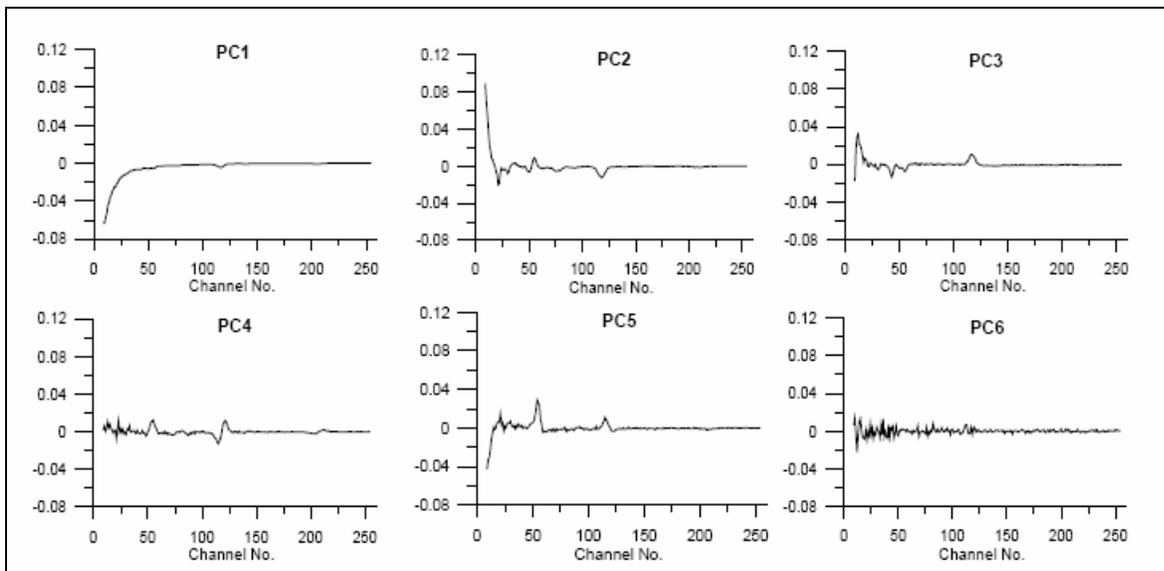


Figura 3.4 - Espectro decomposto em 6 componentes (MAURING & SMETHURST, 2005).

### 3.4 - O Método MNF

A transformação MNF (*Maximum Noise Fraction*) é um procedimento estatístico no âmbito da ACP e representa um aprimoramento desta. Uma das grandes limitações da ACP para a remoção do ruído é que nem sempre se observa, nas componentes principais geradas, um aumento da razão sinal/ruído de forma crescente em relação aos autovalores (GREEN *et al.*, 1988). Essa tendência aumenta com a complexidade dos dados. A vulnerabilidade da ACP para a eliminação do ruído é resultante da priorização da variância no ordenamento dos dados, ao invés da razão sinal/ruído. Assim sendo, Green *et al.* (1998) propuseram o procedimento estatístico MNF, que enfoca o ruído em depreciação da variância do dado. Este é derivado e análogo à transformação ACP, distinguindo-se apenas quanto ao critério para a geração das componentes. O MNF promove a maximização do ruído ao invés da variância dos dados, o que proporciona um ordenamento que reflete a qualidade do sinal. Ao invés de escolher uma nova componente para maximizar a variância, assim como a transformação da componente principal faz, agora se escolhe maximizar a razão sinal/ruído (GREEN *et al.*, 1988).

Considerando o conjunto de dados multivariados composto por  $n$  canais,  $Z_i(x)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , onde  $x$  representa o espectro, assume-se que

$$Z(x) = S(x) + N(x), \quad (3.5)$$

onde  $S(x)$  e  $N(x)$  são os componentes: sinal e ruído não correlacionados de  $Z(x)$ . Então:

$$Cov\{Z(x)\} = \Sigma = \Sigma_S + \Sigma_N, \quad (3.6)$$

onde  $\Sigma_S$  e  $\Sigma_N$  são as matrizes de covariância de  $S(x)$  e  $N(x)$ .

A fração do ruído do  $i$ -ésimo canal é igual a razão entre a variância do ruído e a variância total do canal, isto é  $Var\{N_i(x)\} / Var\{Z_i(x)\}$ . Desta forma, estabelece-se uma matriz de covariância do índice de fracionamento do ruído nos mesmos moldes de uma matriz de covariância em ACP (Figura 3.5 e 3.6).

De caráter linear, a transformação MNF é expressa como:

$$Y_i(x) = a_i^T Z(x), \quad i = 1, \dots, n;$$

usando argumento similar a ACP, temos que  $a_i$  representa os autovetores de  $\Sigma^{-1}\Sigma_N$  e  $\lambda_i$  aos autovalores associados, equivalendo à fração do ruído em  $Y_i(x)$ . Portanto, a partir dessa definição

verifica-se, para a transformação MNF, um ordenamento dos autovalores de acordo com a qualidade do sinal, onde:  $Yi(x).\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ .

De acordo com esta formulação matemática, a grande diferença do MNF para a ACP é a substituição da matriz de covariância-variância ( $M_{ACP}$ ) dos dados pela matriz relativa aos índices de fracionamento de ruído ( $M_{MNF}$ ). A utilização de uma ou outra matriz proporciona a maximização de um determinado tipo de informação.

Matriz de covariância dos canais utilizados nas transformações ACP  $\Rightarrow$  Maximização da Variância.

$$M_{ACP} = \begin{vmatrix} Var Z_1(x) & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} & \dots & \Sigma_{1n} \\ \Sigma_{21} & Var Z_2(x) & \Sigma_{23} & \dots & \Sigma_{2n} \\ \Sigma_{31} & \Sigma_{32} & Var Z_3(x) & \dots & \Sigma_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Sigma_{n1} & \Sigma_{n2} & \Sigma_{n3} & \dots & Var Z_n(x) \end{vmatrix}$$

Matriz de covariância dos canais utilizadas nas transformações MNF  $\Rightarrow$  Maximização do Ruído.

$$M_{MNF} = \begin{vmatrix} \frac{Var \{N_1(x)\}}{Var \{Z_1(x)\}} & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{12} & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{13} & \dots & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{1n} \\ \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{21} & \frac{Var \{N_2(x)\}}{Var \{Z_2(x)\}} & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{23} & \dots & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{2n} \\ \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{31} & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{32} & \frac{Var \{N_3(x)\}}{Var \{Z_3(x)\}} & \dots & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{n1} & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{n2} & \left(\frac{\Sigma_r}{\Sigma}\right)_{n3} & \dots & \frac{Var \{N_n(x)\}}{Var \{Z_n(x)\}} \end{vmatrix}$$

### 3.5 - Implementação dos métodos NASVD e MNF

Os métodos MNF e NASVD, foram transcritos para a sintaxe do MatLab em duas funções – “*eigspecn.m*” para o método NASVD e “*mnfspec.m*” para o método MNF, pois este programa permite manipular funções matemáticas de forma prática e rápida diminuindo consideravelmente o tempo de desenvolvimento, além de permitir testes confiáveis em relação as implementações. Estas foram testadas preliminarmente usando dados brutos de uma área conhecida com finalidade de verificar se eles estavam processando de forma coerente. Na etapa seguinte, compilou-se, ainda dentro do MatLab as funções “*eigspecn.m*” e “*mnfspec.m*” em um único arquivo de vínculo dinâmico: *libeigspecn.dll* (Figura 3.5). Esta opção de compilação em um único arquivo e do tipo vínculo dinâmico – *dll* – tem como motivação a praticidade no processo de desenvolvimento.

Com o *software* de desenvolvimento C++ criou-se outro aplicativo – *GamaFilterGX.dll*, que tem a finalidade de fazer a ligação (link) da biblioteca de vínculo dinâmico *libeigspecn.dll* com o ambiente de programação do *OASIS-MONTAJ* (*Geosoft Development Toolkit*). Este procedimento permite que, usando as ferramentas de desenvolvimento internas do *OASIS-MONTAJ*, aliadas às excelentes bibliotecas matemáticas do MatLab, se possa desenvolver aplicativos e disponibilizá-los para serem utilizados no ambiente de processamento em gamaespectrometria. O resultado desta implementação é o aplicativo (“*plug in*”) “*filter\_spec.gx*”, cuja função principal é aplicação dos filtros implementados NASVD e MNF em dados brutos gamaespectrométricos dentro do ambiente de processamento - *OASIS-MONTAJ* – usando bibliotecas matemáticas modernas e confiáveis.

Fluxograma ilustrativo da Implementação dos métodos NASVD e MNF

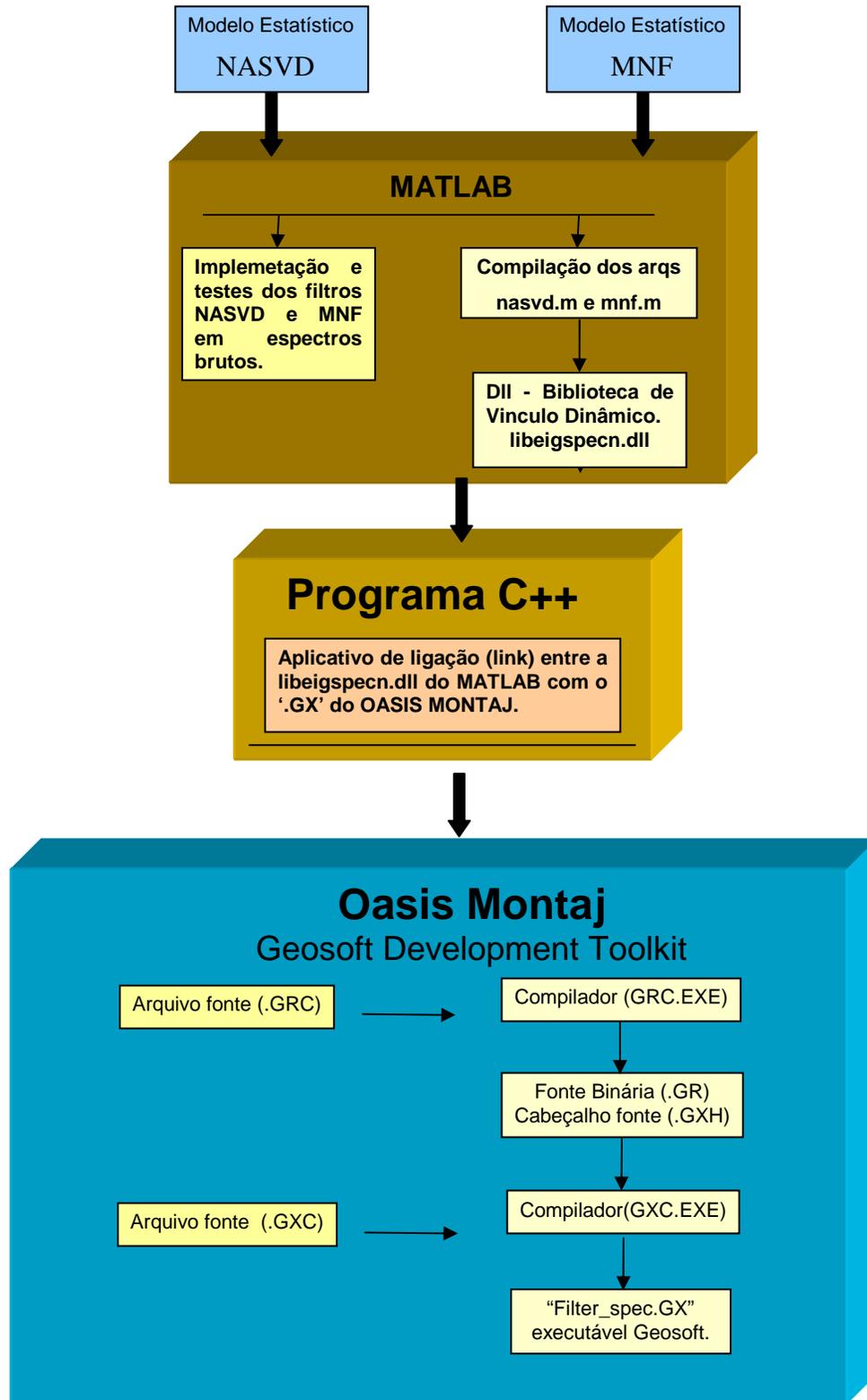


Figura 3.5 - Esquema ilustrativo dos processos envolvidos na implementação dos métodos NASVD e MNF.

### 3.6 - Codificação do Algoritmo NASVD

Para a codificação no MatLab utilizou-se a seguinte fórmula para chegar à matriz resultante:

$$M_{new} = M_{original} \times M_{filtro\_NA} \quad (3.7)$$

$$M_{filtrado} = M_{new} \times M_{filtro} \quad (3.8)$$

onde:

$M_{original}$  (com 256, 512 ou 1024 colunas) é a matriz contendo os valores de detecção gama em cada linha;

$M_{filtro\_NA}$  (com 256, 512 ou 1024 colunas e mesmo número de linhas da matriz original) é a matriz filtrada pelo NA resultante (equação 3.3);  $M_{filtro\_NA} = \frac{1}{\sqrt{ST_k(j) * Sum(i)}}$

$M_{filtrado}$  (com 256, 512 ou 1024 colunas e mesmo número de linhas da matriz original) é a matriz filtrada resultante e  $M_{filtro} = \frac{eigen}{(eigen^T \times eigen) \times eigen^T}$  (3.9)

é uma matriz quadrada, onde:  $eigen = eig(M_{original}^T \times M_{original})$  (3.10)

A quantidade de autovetores considerada altera o resultado final, pois os autovetores relacionados a autovalores menos significativos tendem a carregar a informação aleatória do ruído capturado. Quanto maior o número de componentes gerados mais próximo o dado filtrado se parecerá com os dados brutos (Figuras 4.5 e 4.6). Apesar desta característica, nos levantamentos gamaespectométricos, a informação concentra-se nos componentes mais significativos (Figura 3.3). Assim a filtragem, com um menor número de autovetores, apresenta resultados consistentes sem perder, de modo significativo, a informação necessária. Utilizando o *software* Matlab pode-se aplicar o filtro na matriz de entrada (equação 3.7).

O método de filtragem NASVD foi codificado no MatLab – programa fonte *eigspecn.m*, de acordo com a seqüência abaixo:

```
function [M2,Vec]=eigspecn(A,n)
A é a matriz contendo os valores de detecção gama em cada linha;
n é o número de componentes passado como parâmetro;
M2 é a matriz filtrada;
Vec é conjunto de "n" autovetores associados aos "n"
    autovalores mais significativos;
eps = 2.2204e-016;

[nl nc]=size(A);

% 1ª Etapa - "NA"
sum_i = sum(A')';
invs= repmat(ones(nl,1)./sum_i,1,nc);
S =A.*invs;

SNK=sum(S);
SNI=sum(S')';
STK=SNK/sum(SNI);

for i=1:nl
    Anew(i,:)=A(i,:)./sqrt(STK.*sum_i(i) + eps);
end

% 2ª Etapa - "SVD":
M=Anew*Anew';
[e,v]=eig(M);
es = e(:,end-(0:n));
Vec=es/(es'*es)*es';
M2 = (A'*Vec)';
```

### 3.7 - Testes do Algoritmo NASVD

Aplicando o filtro NASVD em uma matriz que representa todos os espectros de uma linha de vôo, considerando 8 componentes (Figura 3.6), pode-se fazer uma comparação entre o espectro original e o filtrado. Observa-se que grande parte do ruído é eliminada, pois as componentes 7 e 8, onde se concentrou o ruído, foram descartadas na reconstrução do espectro filtrado.

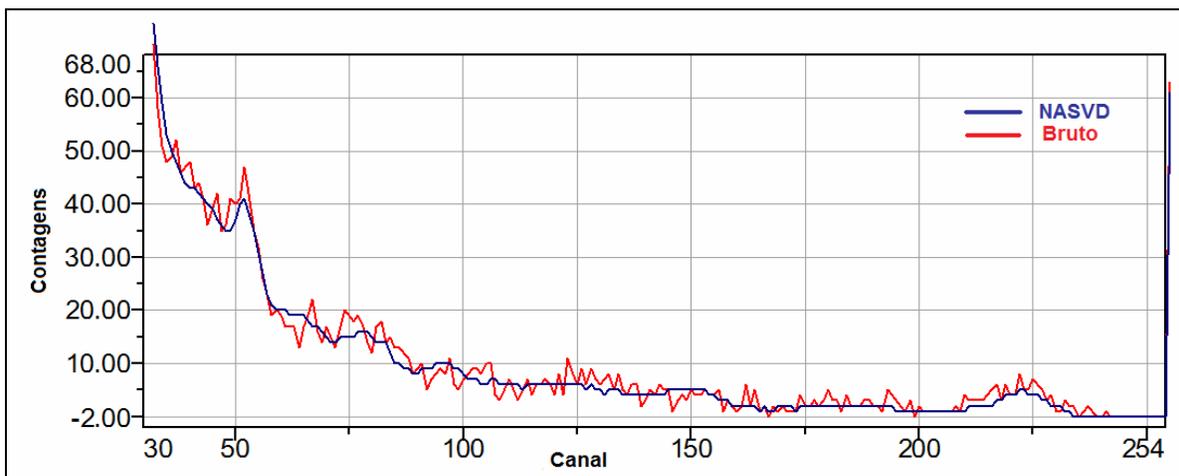


Figura 3.6 - Comparação entre um espectro original de Urânio (linha vermelha) e o mesmo filtrado pelo NASVD (linha azul) em um ponto amostrado, utilizando 8 componentes.

### 3.8 - Codificação do Algoritmo MNF

Para a codificação no MatLab utilizou-se a seguinte fórmula para se chegar à matriz resultante:

$$M_{filt} = \left( \frac{M^T \times M}{n} \right)^{-1} \times M, \quad (3.11)$$

onde:  $n$  é o número de canais do espectro.

O produto  $M^T \times M$  deve ser normalizado antes de se obter a sua pseudo-inversa<sup>1</sup>. O uso da pseudo-inversa torna-se necessária, pois não se garante a inversibilidade de toda matriz gerada pelos dados dos espectros.

O método de filtragem MNF foi codificado no MatLab – programa fonte *mnfspec.m*, de acordo com a seqüência abaixo:

```
function [M,N]=mnfspec(A,b)
A é a matriz contendo os valores de detecção gama em cada linha;
b é o número de componentes passado como parâmetro;
M é a matriz filtrada;
N é conjunto de "n" autovetores associados aos "n" autovalores
  mais significativos;

S=(A*A')/size(A',1);
[e,v]=eig(S);
vi = (diag(diag(v((end-b):end),(end-b):end)).^-1));
N = e(:,(end-b):end)*vi*e(:,(end-b):end)';

  matriz de Saida

M = (A'*N)';
```

---

1 - Se uma matriz não é quadrada, não é possível calcular a sua inversa, então usa-se o conceito de *pseudo-inversa* de uma matriz  $X$ , definindo-a como  $X^+$  e calculando-a através de  $(X^t X)^{-1} X^t$ .

---

### 3.9 - Testes do Algoritmo MNF

Utilizando a mesma matriz que foi aplicada no teste do filtro NASVD, o filtro MNF foi usado (Figura 3.7) no espectro original de Urânio e comparado ao filtrado, considerando 8 componentes. Aqui também foi observada a remoção de grande parte do ruído.

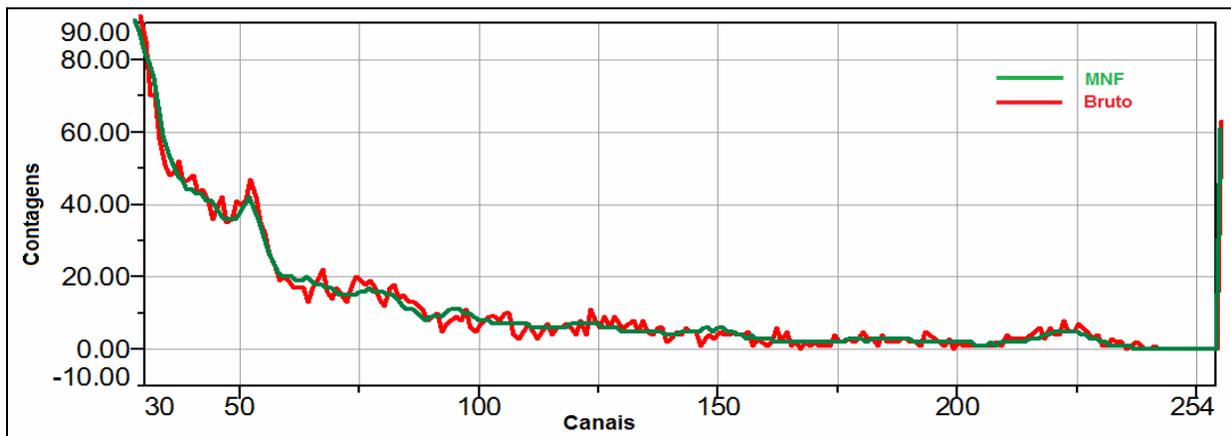


Figura 3.7 - Comparação entre um espectro original de Urânio (linha preta) e o mesmo filtrado pelo MNF (linha verde) em um ponto amostrado, utilizando 8 componentes.

O passo seguinte foi usar o processo de compilação do MatLab, gerando uma biblioteca de vínculo dinâmico - *libeigspecn.dll*, unindo os arquivos *eigspecn.m* e *mnfspec.m*

### 3.10 - Interface GX para Filtros NASVD e MNF

Após testar os filtros NASVD e MNF, compilá-los, criando a biblioteca de vínculo dinâmico - libeigspecn.dll, foi desenvolvido em C++ o aplicativo “*GamafilterGX.dll*” que faz a ligação (link) entre a biblioteca do MatLab e o Filter\_spec.GX, aplicativo codificado e compilado usando as ferramentas de desenvolvimento interno do *OASIS MONTAJ* (Figura 3.5). O Filter\_spec.GX é a interface com usuário (Figura 3.8) e foi desenvolvida de forma a ser intuitiva e facilitar a operação dos profissionais familiarizados com o ambiente do *software OASIS MONTAJ*.



Figura 3.8 - Janela de interação com o usuário dos filtros NASVD e MNF.

Os seguintes passos devem ser observados quanto a sua utilização:

- o canal de entrada, espectro de origem, deve ser escolhido e informado;
- o canal de saída para o espectro filtrado deve ser criado dentro do arquivo de extensão gdb do *OASIS MONTAJ* com um nome qualquer, antes da execução do filtro;
- o número de componentes a serem considerados como os mais significativos para a aplicação da filtragem NASVD é padronizado em 8, mas pode-se escolher outros dentro de um menu;
- a opção por tipo de filtro deve ser informada. O filtro é aplicado somente nas linhas de vôo selecionadas (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Janela de interação com a opção por tipo de filtro.

### 3.11 - Fundamentação Matemática

#### 3.11.1 - Distribuição de Poisson

$$P(x) = \frac{\psi^\alpha e^{-\psi}}{x!} \quad (x = 0,1,2,3,\dots) \quad (3.12)$$

onde:  $\psi$  é uma constante dada.

Uma propriedade importante, e frequentemente usada em gamaespectrometria, desta distribuição é que o desvio padrão é igual à raiz quadrada da razão de contagem média, ou seja:

$$\sigma = \sqrt{n}, \text{ onde } n \text{ é razão de contagem média (GILMORE, 1995).}$$

Da mesma maneira a variância de uma distribuição é o desvio quadrático médio e equivale ao quadrado do desvio médio.

$$v = \sigma^2 = n \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.13)$$

#### 3.11.2 - Análise das Principais Componentes - ACP

Suponha-se que existam  $n$  vetores de dados a serem analisados, cada qual com  $m$  elementos agrupados como colunas lado a lado na matriz  $X$ ,

$$X = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_n \end{bmatrix}$$

Além disso, sem perda de generalidade, que  $\mu(X_k) = 0$ , para  $k = 1, \dots, n$ ;

O intuito é achar combinações lineares das colunas de  $X$  de forma que a variância desses novos vetores seja máxima e, que além disto, tais vetores sejam não-correlacionados. Isto é, deseja-se achar  $n$  novos vetores

$$\begin{bmatrix} Y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_k \end{bmatrix} = a_{1k} \begin{bmatrix} X_1 \end{bmatrix} + a_{2k} \begin{bmatrix} X_2 \end{bmatrix} + \dots + a_{nk} \begin{bmatrix} X_n \end{bmatrix}$$

para  $k = 1, \dots, n$ , tal que  $\text{var}(Y_k)$  seja máxima e que  $\text{cov}(Y_i, Y_j) = 0$  para  $i \neq j$ . Usando uma notação mais sintética, deseja-se achar uma matriz  $A(n \times n)$ , de modo que a matriz transformada:

$$Y = XA \tag{3.14}$$

seja tal que, se suas colunas tiveram variância máxima, sejam não-correlacionadas. Vale ressaltar que as incógnitas deste problema são os coeficientes  $a_{ij}$  da matriz  $A$ .

A matriz de covariância de  $Y$  pode ser utilizada para descrever o problema do ACP. Como exigido que a variância de cada coluna de  $Y$  seja máxima e que todas as colunas tenham covariância nula, isto equivale a dizer que a matriz de covariância deve ser diagonal, isto é,

$$\text{cov}(Y_i, Y_j) = 0, \text{ para } i \neq j.$$

Por outro lado, a covariância de dois vetores que são combinações lineares de um mesmo conjunto  $X$  é dada por

$$\text{cov}(Y_i, Y_j) = \frac{1}{m-1} Y_i^T Y_j = \frac{1}{m-1} A_i^T X^T X A_j,$$

levando à equação matricial

$$C_Y = A^T C_X A,$$

onde  $C_Y$  e  $C_X$  são as matrizes de covariância de  $Y$  e  $X$ , respectivamente. Como  $C_Y$  é diagonal, tem-se o clássico problema de diagonalização de matrizes para a matriz  $C_X$ , cuja resolução pode ser feita pelo cálculo dos seus autovalores e autovetores. Outro modo é fazer a decomposição SVD da matriz  $X$ , que faz uso de componentes ortogonais, facilitando a resolução dos cálculos.

### 3.11.3 Decomposição SVD

A decomposição SVD constrói uma nova base ortonormal tanto para o espaço imagem quanto para o espaço domínio (NOBLE, 1977).

Considerando-se uma transformação  $A$  definida por meio da matriz  $A(m \times n)$  por  $A(x) = Ax$ . Tomando-se um conjunto ortonormal arbitrário de vetores  $\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n$ , usado como base para o espaço  $R^n$  (ou  $C^n$ ), enquanto o conjunto ortonormal arbitrário de vetores  $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_m$  é usado como base para o espaço  $R^m$  (ou  $C^m$ ). Se forem definidos as matrizes unitárias  $V$  e  $U$ , respectivamente  $n \times n$  e  $m \times m$ , por meio de

$$V = [v_1, \dots, v_n]$$

$$U = [u_1, \dots, u_m]$$

então, as novas coordenadas  $x'$  (relativos aos novos vetores básicos  $\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n$ ) de um vetor  $\vec{x}$  no domínio  $R^n$  (ou  $C^n$ ) são dadas por:

$$x' = V^T x$$

$$x = Vx'$$

enquanto as relações de imagem são:

$$y' = U^T y$$

$$y = Uy'$$

Fazendo  $y = A(x) = Ax = AVx'$ , obtemos  $y' = U^T y = U^T AVx'$ . Resumidamente, a transformação linear  $A$  definida por  $A$  é representada às duas novas bases ortonormais pela matriz  $m \times n$ .

$$A' = U^T AV \tag{3.15}$$

O objetivo, portanto, é achar duas matrizes unitárias  $V$  e  $U$  tais que a matriz  $A'$  seja calculada pela equação (3.15).

Quando  $m = n$ , de maneira que  $A$  seja quadrada, a forma de Schur<sup>2</sup> fornece uma redução à equação (3.15) com  $U = V$  e  $A'$  triangular superior. Considerando, agora, o que seria exigido de  $V$  e  $U$  a fim de que a equação (3.15) forneça a simplificação de  $A$  a uma forma diagonal  $A'$ .

Mudando ligeiramente a notação tem-se que:

$$U^T AV = \Sigma \tag{3.16}$$

Onde  $A$  é  $m \times n$ ,  $V$  e  $U$  são matrizes unitárias  $n \times n$  e  $m \times m$ . Finalmente

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \text{ é } m \times n.$$

A hipótese mais razoável para  $\Sigma$  é que este seja nulo em toda sua extensão, exceto para a diagonal principal, ou seja:

$$\Sigma = (\sigma_{ij}) \text{ satisfaz } \sigma_{ij} = 0 \text{ se } i \neq j \tag{3.17}$$

Se a equação (3.16) for verificada, temos, então, a decomposição

$$A = U\Sigma V^T \tag{3.18}$$

De (4.13) segue-se que

$$A^T A = V\Sigma U^T U\Sigma V^T = V(\Sigma^T \Sigma)V^T$$

2 - Qualquer matriz quadrada  $A$   $n \times n$  pode ser reduzida, por meio de uma transformação unitária  $P^T AP$ , a uma matriz  $\phi$  triangular superior (de maneira que  $\phi_j = 0$  para  $1 \leq j < i$  e  $1 < j \leq n$ ) com os autovalores de  $A$  sobre a diagonal de  $\phi$ .

$\phi$  é chamado de forma canônica de Schur para  $A$  e a decomposição  $A = PTP^T$  é chamada uma decomposição de Schur de  $A$ .

---

onde  $\Sigma^T \Sigma$  é uma matriz diagonal  $n \times n$  pois  $\sigma_{ij} = 0$  para  $i \neq j$ . Como  $V$  é unitária, sabe-se que os valores de  $\sigma_i^2$ , os elementos diagonais de  $\Sigma^T \Sigma$  são simplesmente os autovalores de  $A^T A$ , enquanto que as colunas de  $V$  fornecem os autovetores associados. Assim:

$$AA^T = U(\Sigma\Sigma^T)U^T$$

Onde  $\Sigma\Sigma^T$  é a diagonal, vemos que os números  $\sigma_i^2$  dão também os autovalores de  $AA^T$  com autovalores associados dados pelas colunas  $U$ . Os elementos não-nulos  $\sigma_i$  da diagonal de  $\Sigma$  são os chamados valores singulares de  $A$ .

Supondo que a matriz  $A(m \times n)$  tem posto  $k$ . Existem números  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k > 0$  onde os valores singulares de  $A$  para uma matriz unitária  $Um \times m$ ,  $U = [u_1, \dots, u_m]$  e uma matriz unitária  $V(n \times n)$ ,  $V = [v_1, \dots, v_n]$ , tais que (3.16) e (3.17) sejam satisfeitas, ou seja,  $\Sigma = U^T AV$  e  $A = U\Sigma V^T$  com a matriz  $m \times n$  resulta em

$$\Sigma = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Onde  $D$  é uma matriz diagonal  $k \times k$  com o  $i$ -ésimo elemento da diagonal  $d_{ii} = \sigma_i > 0$  para  $1 \leq i \leq k$ . Além disso, para  $1 \leq i \leq k$ ,  $u_i = \sigma_i^{-1} AV$  e  $v_i = \sigma_i^{-1} A^T u_i$  são autovalores de  $AA^T$  e de  $A^T A$ , respectivamente, ambos associados com o autovalor  $\sigma_i^2 > 0$ ; os vetores  $u_i$  para  $k+1 \leq i \leq m$  e  $v_i$  para  $k+1 \leq i \leq n$  são autovetores de  $AA^T$  e de  $A^T A$ , respectivamente, todos associados ao autovalor zero.

### CAPÍTULO IV – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NASVD E MNF

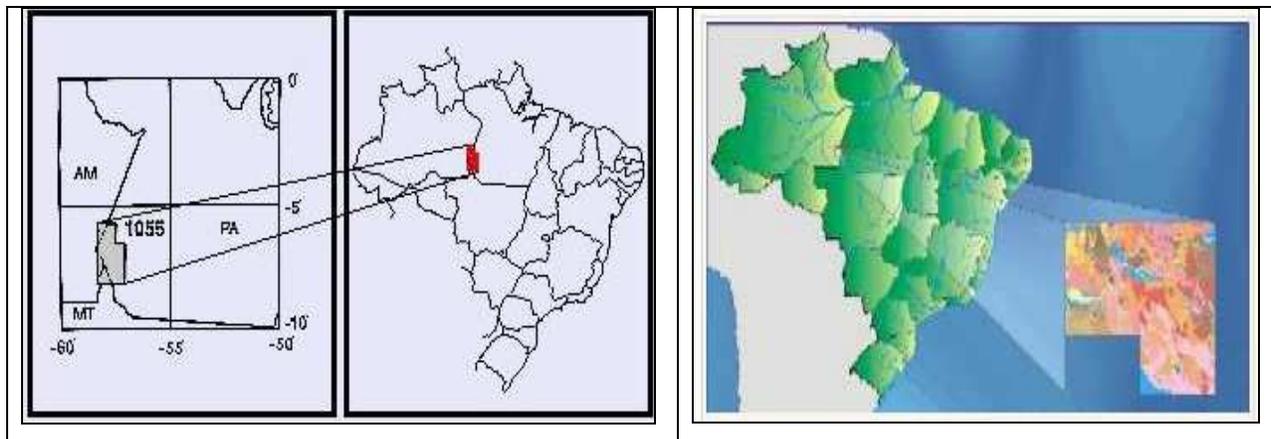
#### 4 - APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NASVD E O MNF

Neste capítulo será apresentada a aplicação dos métodos NASVD e MNF a dados reais pertencentes à COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM e relativos ao PROJETO AEROGEOFÍSICO ‘PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS – BLOCOS I E II’ (CPRM, 2008). Inicialmente, são apresentadas a localização e uma breve descrição geológica da área estudada. Os coeficientes utilizados pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S.A (LASA, 1998) para o processamento dos dados são apresentados e utilizados neste trabalho, mostrando a seqüência lógica aplicada aos espectros originais e filtrados, resultando em um conjunto de mapas que foram utilizados na análise final de resultados.

Os passos seguintes consistem em aplicações dos filtros em espectros dos dados originais em ambiente *OÁSIS MONTAJ* – versão 5.18. Após a aplicação dos filtros NASVD e MNF, os espectros foram separados em quatro grupos de espectros (espectros brutos originais, filtrados pelo NASVD, filtrados pelo MNF e filtrados pelo Passa-Baixa). A análise foi feita em etapas fazendo comparações visuais (perfilagem) entre os espectros (originais e filtrados) e intervalos de energia de interesse (canais de Urânio, Potássio e Tório). Também se fez uso do diferença Percentual do ruído (em relação ao espectro original), numa tentativa de se estabelecer um procedimento de escolha de um determinado filtro, com sua respectiva quantidade de componentes. Finalizando, fez-se uma análise dos mapas resultantes das filtragens e dos espectros originais, que somam aproximadamente 200. Dentre estes foi escolhido um conjunto de mapas e apresentado neste trabalho.

#### 4.1 - Localização e acesso à área investigada

A área de estudo localiza-se na Região Amazônica, abrangendo parte do sudoeste do Estado do Pará e sudeste do Estado do Amazonas, compreendendo cerca de 74.979km<sup>2</sup> (Figura 4.1). Politicamente, essa área situa-se no interior dos municípios paraenses de Itaituba, Jacareacanga, Novo Progresso e Trairão, além do município amazonense de Maués e está limitada pelos paralelos 05 00’ e 08 00’ de latitude sul e pelos meridianos 55 30’ e 58 30’ de longitude oeste de *Greenwich*.



**Figura 4.1 - Localização do levantamento aerogeofísico do Projeto Província Aurífera do Tapajós (CPRM, 2008).**

#### **4.2 - Geologia da área estudada**

Os dados produzidos pelo levantamento geológico promovido pelo Projeto PROMIN-Tapajós, aliados a uma reavaliação dos dados existentes, permitiram compor um quadro regional para a Província Tapajós, no qual são reconhecidos dois domínios tectônicos, um orogênico e outro pós-orogênico a anorogênico (Figura 4.2), com limites um tanto irregulares. As unidades mais antigas da Província Tapajós, que constituem o seu embasamento, são rochas metavulcano sedimentares relacionadas ao Grupo Jacareacanga e gnaisses e granitóides granodioríticos a tonalíticos, com raros migmatitos e anfíbolitos associados, do Complexo Cuiú-Cuiú (ALMEIDA et al., 1999b). Estes conjuntos compõem o domínio orogênico da província e distribuem-se de forma alongada segundo NW-SE, orientação dos grandes lineamentos, predominantemente transcorrentes, que controlam a forma dos corpos rochosos. A maior parte da província é coberta pelas unidades com origem e colocação ligadas às fases extensionais pós-orogênica a anorogênica (TASSINARI e MACAMBIRA, 1999).

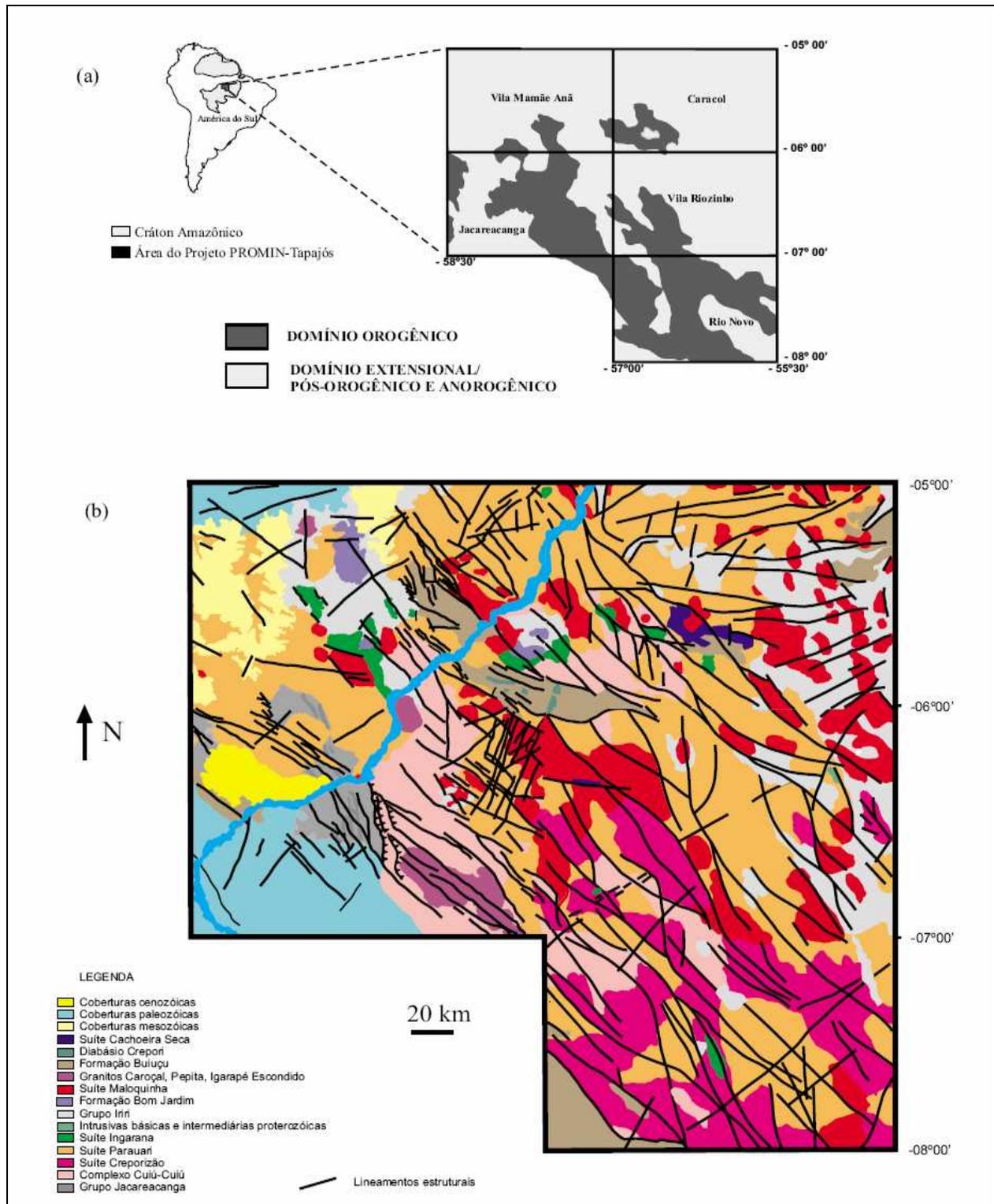
Na região a ser estudada (Figura 4.2) o embasamento corresponde ao Complexo Cuiú-Cuiú, do paleoproterozóico. São migmatitos, gnaisses e anfíbolitos metamorfizados na fácies anfíbolito superior compostos, predominantemente, por tonalitos e granodioritos (ALMEIDA et al. 1998). Associada ao embasamento está o Grupo Jacareacanga definido como uma seqüência vulcano-sedimentar metamorfizada em fácies xisto-verde (BAHIA et al. 2000). Compreende

metassedimentos depositados em ambiente plataformal e sugerem uma sedimentação durante o Ciclo Transamazônico (SANTOS *et al.* 1997).

O embasamento é cortado por sienogranitos e monzogranitos sin a tardi-tectônicos denominados de Suíte Intrusiva Creporizão. Análises químicas caracterizam um magmatismo calci-alcalino relacionados a arcos continentais (BAHIA *et al.* 2000). Este evento plutônico foi seguido por magmatismo de ampla variação faciológica gerando batólitos, em sua maioria isotrópica, de dimensões regionais denominados de Suíte Intrusiva Parauari (BAHIA *et al.* 2000). Plutônicas máficas tardias relacionadas a este evento foram identificadas na região e denominados de Suíte Intrusiva Ingarana (BAHIA *et al.* 2000).

O final do paleoproterozóico é marcado por regime distensivo denominado de Evento magmático Uatumã responsável pela implementação de uma extensa seqüência vulcanosedimentar. Neste contexto inserem-se: a Formação Bom Jardim constituída, em sua maioria, por andesitos, representando a fase mais precoce de composição química intermediária; a Formação Salustiano correspondente ao vulcanismo ácido calci-alcalino, de ambiente continental constituído de riolitos, riodacitos e dacitos; a Formação Aruri formada por fácies vulcanoclásticas, piroclásticas e epiclásticas representadas por tufos, ignimbritos, arenitos, brechas e conglomerados (BAHIA *et al.* 2000). A Suíte Intrusiva Maloquinha marca o plutonismo ácido pós-orogênico associado ao Evento Uatumã e é constituída por alcali-feldspato, granitos e sienogranitos. A fase final deste plutonismo é representada pela Suíte Intrusiva Porquinho e pelos granitos Pepita, Igarapé Escondido e Caroçal. Apresentam textura rapakivi e caráter alcalino a calcialcalino, variando de aluminoso a peraluminoso, caracterizando granitos do tipo A gerados em ambientes intraplaca (BAHIA *et al.* 2000). As rochas magmáticas são recobertas por sedimentos clásticos de ambiente continental da Formação Buiçu.

Entre o Paleoproterozóico e Mesoproterozóico ocorreram manifestações básicas representadas pelo Diabásio Crepori, o que se estendeu até o final do Mesoproterozóico com as intrusões dos Lamprófiros Jamanxim e da Suíte Intrusiva Cachoeira Seca (BAHIA *et al.* 2000).



**Figura 4.2 - (a) Localização e compartimentação tectônica da Província Tapajós e (b) Mapa geológico integrado e simplificado – gerado a partir dos cinco mapas geológicos 1:250.000 apresentados acima (CPRM, 2008).**

O Fanerozóico é caracterizado por coberturas sedimentares paleozóicas representadas pelo Grupo Jatuarana, de idade devoniana, pertencente à Bacia do Alto Tapajós sendo sobreposta pela formação Ipixuna do Permo-Carbonífero. A Bacia do Amazonas é representada pela formação Monte Alegre, também do Permo-Carbonífero. Estes litotipos estão associados a ambientes costeiros dominados por marés (BAHIA *et al.* 2000).

O Mesozóico é marcado por intrusões de diques de diabásio cretáceo e pela Formação Alter do Chão, da Bacia do Amazonas, formados por arenitos continentais de origem fluvial (BAHIA *et al.* 2000). O Cenozóico está representado por uma Cobertura Detrítica e Laterítica e pelos sedimentos Quaternários ao longo das drenagens da região (BAHIA *et al.* 2000).

### **4.3 - Dados Gamaespectrométricos**

O aerolevanteamento foi efetuado a altura constante de 100m e com linhas de vôo e controle espaçado entre 1.000 e 13.000m, respectivamente, tendo as linhas de vôo à direção N-S, e linhas de controle E-W. Ao longo dos perfis foram realizadas leituras do gamaespectrômetro por segundo, posicionadas com sistema de observação de satélite GPS, de precisão melhor do que 10m. Os dados foram registrados a bordo da aeronave, digital e analogicamente, pelo sistema de aquisição GEODAS.

Em seguida eles foram processados pela empresa Lasa, e reprocessados neste trabalho utilizando-se os coeficientes determinados no Relatório Final do Levantamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos (volume I).

### **4.4 - Processamento dos Dados Radiométricos**

O processamento dos dados gamaespectrométricos realizado neste trabalho obedeceu aos procedimentos recomendados pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1991) e seguiu a rotina contida no sistema de processamento radiométrico - RPS da OASIS MONTAJ – 5.18. Os coeficientes apresentados a seguir foram determinados pela empresa Lasa Engenharia e Prospecções S.A (LASA, 1998).

### 4.4.1 - Correção do Tempo Morto

A correção do tempo morto não é aplicada para o sistema PGAM-1000, por se tratar de sistema auto calibrável onde são utilizados conversores analógico-digitais associados a cada um dos cristais detectores. Tal característica do gamaespectrômetro PGAM 1000 torna o valor do tempo morto muito pequeno, sendo considerado desprezível no processamento.

### 4.4.2 - Aplicação de Filtragem

Este processo se aplica somente aos dados afetados por variações de alta frequência, quais sejam: dados do radar altímetro, do canal de radiação cósmica e do canal de Urânio *up*, utilizados no cálculo da influência do radônio nas medições realizadas. Dependendo do comportamento dos dados são aplicados dois tipos de filtragem:

- Filtragem não linear que permite a remoção de picos (*spikes*) nos dados e a compensação de variações abruptas do radar altímetro;
- Filtragem do tipo Passa-Baixa que reduz o erro nos dados da radiação cósmica e suaviza o comportamento do radônio. Opcionalmente, é aplicada aos demais canais gamaespectrométricos com objetivos específicos, como o cálculo das razões radiométricas.

### 4.4.3 - Cálculo da Altura Padrão de Vôo

A altura de vôo foi ajustada com base na temperatura e pressão ambientais utilizando-se da fórmula:

$$hc = h (273.15/T+273.15) \times (P/1.013.25), \text{ sendo:}$$

h - altura de vôo medida pelo radar altímetro,

T - temperatura do ar medida em °C,

P- pressão atmosférica em milibar.

A pressão atmosférica é obtida a partir da altitude medida pelo altímetro barométrico.

### 4.4.4 - Remoção do Background da Aeronave e Cósmico

A correção *background* é obtida através da somatória das contribuições do *background* da aeronave e da radiação cósmica em cada uma das janelas do gamaespectrômetro.

---

O cálculo das contribuições da aeronave e da radiação cósmica é conduzido através da fórmula (IAEA, 1991):

$$N = a + bC, \text{ onde:}$$

N - somatória das duas contribuições (em cps);

a - *background* da aeronave em cada janela do gamaespectrômetro;

C - canal de radiação cósmica;

b - razão entre a contagem em determinada janela e a contagem no canal cósmico.

Os coeficientes aplicados aos dados foram definidos pelo vôo Cósmico (Tabela 4.1).

**Tabela 4.1** - Coeficientes obtidos no vôo Cósmico.

Coeficiente	C. Total	K	U	Th	U up
a (cps)	154,81	12,94	5,77	2,67	2,50
b	0,7891	0,0291	0,0482	0,0632	0,0131

#### 4.4.5 - Cálculo do *Background* do Radônio

O efeito do *background* do radônio, por sua vez, foi determinado a partir das medições realizadas na janela do Urânio pelo detector *upward looking*. A expressão que define a parcela de radônio influenciando no canal do Urânio é a seguinte:

$$U_r = (u - a_1U - a_2Th) + (a_2bt - bu) / (a_u - a_1 - a_2at), \text{ onde:}$$

$U_r$  - *background* do radônio medido no canal *downward* do Urânio,

u - contagem medida no canal *upward* do Urânio,

U - contagem medida no canal *downward* do Urânio,

Th - contagem medida no canal *downward* do Tório,

$a_1, a_2, a_u, a_t, b_u, b_t$  - coeficientes de proporcionalidade, sendo que  $b_u$  e  $b_t$  são zerados e  $a_1$  e  $a_2$  os coeficientes *skyshine*.

As contagens relativas ao Urânio, Tório e *Urânio-up* foram corrigidas previamente dos efeitos do *background* cósmico e da aeronave.

A relação entre as contagens atribuídas ao radônio observadas na janela do Urânio, com as demais janelas de canais *downward*, detectadas nos cristais voltados para baixo, pode ser

## CAPÍTULO IV – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NASVD E MNF

---

determinada através de regressão linear aplicada sobre um conjunto de dados que refletem as variações decorrentes da presença de radônio nos dados.

O procedimento de cálculo dos coeficientes que expressam a relação entre os detectores (*upward* e *downward*) utiliza as seguintes fórmulas (IAEA, 1991):

- $ur = auUr + bu,$
- $Kr = akUr + bk,$
- $Tr = atUr + bt,$
- $TCr = atcUr + btc,$  onde:

$ur$  é a componente do radônio no Urânio  $ur$ ,  $Ur$ ,  $Kr$ ,  $Tr$  e  $TCr$  são as contribuições do radônio nas demais janelas associadas ao detector *downward*. Se os componentes dos *backgrounds* da aeronave e cósmico forem perfeitamente removidos, as constantes “b’s” ( $bu$ ,  $bk$ ,  $bt$  e  $btc$ ) devem ser zeradas (IAEA, 1991).

No cálculo dos coeficientes  $au$ ,  $ak$ ,  $at$  e  $atc$  foram utilizados dados de testes realizados na área do levantamento, denominados *high-level test*, executados na altura padrão de 2.500 pés sobre o terreno. Estes coeficientes, obtidos por regressão linear, estão indicados na tabela abaixo:

**Tabela 4.2** - Coeficientes  $au$ ,  $ak$ ,  $at$  e  $atc$  e seus respectivos valores obtidos de dados de testes realizados na área do levantamento.

CANAL	COEFICIENTE	VALOR OBTIDO
Urânio	$au$	0,241
Tório	$at$	0,080
Potássio	$ak$	0,804
Contagem Total	$atc$	14,00

### 4.4.6 - Estimativa dos Coeficientes Skyshine ( $a_1$ e $a_2$ )

Estes coeficientes relacionam a contribuição das radiações de Urânio e Tório provenientes do terreno que influenciam as contagens do Urânio no detector *upward*. Admitindo-se que tais contribuições variem linearmente com as contagens destas mesmas radiações nas janelas de Urânio e Tório, nos detectores voltados para baixo, a estimativa destes coeficientes emprega a expressão geral  $ug = a_1 Ug + a_2 Tg$ , onde:

---

ug - contribuição do solo na janela do Urânio *up*;

Ug - contribuição do solo na janela do Urânio *down*;

Tg - contribuição do solo na janela do Tório;

a1 e a2 - constantes de calibração requeridas.

Para a estimativa dos coeficientes *skyshine* foi adotado o procedimento simplificado (Grasty & Hovgaard, 1996). Este procedimento emprega a totalidade dos dados dos canais de Urânio *up* e *down* do levantamento, para obtenção de a1, assumindo que o valor de a2 é igual a zero, qual seja:

$a1 = (Sun-un+m)/(SUn-Un+m)$ , sendo:

n e n+m os índices de amostras subseqüentes, associados aos canais de Urânio *up* (u) e *down* (U). Como estes somatórias levam em conta valores absolutos, o canal de contagem total é utilizado para indicar a tendência crescente ou decrescente das radiações.

O valor de a1 foi estimado pela metodologia acima em 0,074.

### 4.4.7 - Correção do Efeito Compton

É aplicada com o objetivo principal de eliminar a influência das radiações atribuídas aos canais de mais alta energia que penetram nos canais de baixa energia, quais sejam: contribuições do Tório no Urânio e no Potássio, assim como a contribuição do Urânio no Potássio. Nos sistemas de alta resolução, em uso atualmente, são também consideradas as influências de radiações de baixa energia nas janelas de energia mais alta, resultando, desta forma, nos seis coeficientes abaixo:

a - radiações de Tório no Urânio,

β - radiações de Tório no Potássio,

γ - radiações de Urânio no Potássio,

a - radiações de Urânio no Tório,

b - radiações de Potássio no Tório,

g - radiações de Potássio no Urânio.

Os valores adotados para correção do efeito *Compton* foram: a=0,2497, β=0,3911 e γ.=0,7209, a=0,0412, b=0,0008 e g=0,0026, obtidos com a calibração realizada, em 29.09.97,

sobre os “tanques de calibração” (K, U, Th e *background*, de propriedade da LASA), disponíveis no aeroporto de Itaituba (PA).

#### 4.4.8 - Correção Altimétrica

A correção altimétrica tem por objetivo referenciar os valores radiométricos à altura nominal do aerolevante (100m), eliminando falsas anomalias ocasionadas por elevações no terreno. A atenuação das radiações gama em relação ao afastamento da fonte pode ser expressa matematicamente, de forma aproximada, pela fórmula (IAEA, 1991):

$NH = No \cdot e^{-\mu H}$  (1), onde:

NH é a radiação à distância H da fonte,

No é a radiação na superfície do terreno (H=0),

$\mu$  é o coeficiente de atenuação atmosférica,

Extraíndo-se o logaritmo neperiano na relação acima, tem-se:

$\ln(NH) = -\mu H + \ln(No)$  que é a equação de uma reta de coeficiente angular  $-\mu$  e coeficiente linear  $\ln(No)$ . Na determinação dos coeficientes de atenuação atmosférica ( $\mu$ ) para cada um dos canais radiométricos são efetuadas regressões lineares dos logaritmos neperianos dos valores radiométricos  $\ln(NH)$  em relação às alturas de vôo (de 200 a 900 pés com incremento de 100 pés) sobre a “pista de calibração dinâmica” (*dynamic calibration range - DCR*) situada no distrito de Inoã, Município de Maricá (RJ). Os valores de  $\mu$  obtidos foram corrigidos do *background* da aeronave, cósmico e do radônio, bem como do efeito do espalhamento *compton*, sendo apresentados abaixo:

**Tabela 4.3** - Coeficientes de atenuação atmosférica ( $\mu$ ) para cada um dos canais radiométricos

Canal Radiométrico	$\mu$ em m <sup>-1</sup>
Contagem Total	- 0,0069
Potássio	- 0,0080
Urânio	- 0,0063
Tório	- 0,0067

A aplicação da correção altimétrica é feita conforme mostrado a seguir:

Fazendo na equação (4.1)  $H = H_{100} = 100\text{m}$  (altura nominal do levantamento) tem-se:

$$N_{100} = N_0 \cdot e^{-\mu H_{100}} \quad (4.2)$$

Dividindo-se (4.2) por (4.1), obtem-se:

$$N_{100} = NH \cdot e^{-\mu(H_{100} - H)} \quad (4.3), \text{ onde:}$$

- $N_{100}$  é a taxa de contagem normalizada para a altura do levantamento (100m) para um determinado canal;
- $NH$  é a taxa de contagem corrigida do *background* da aeronave, cósmico e do radônio, bem como do efeito do espalhamento *compton*;
- $\mu$  é o coeficiente de atenuação atmosférica para determinado canal;
- $H_{100}$  é a altura nominal de vôo (100m)
- $H$  é a altura medida.

### 4.4.9 - Conversão para Concentração de Elementos

A sensibilidade dos detectores da aeronave PT-KNE para as janelas do Potássio, Urânio e Tório foi determinada com base na correlação entre as medições efetuadas a bordo e em terra, com a aplicação da expressão:

$$S = N/C, \text{ onde:}$$

- $S$  corresponde à sensibilidade para cada janela,
- $N$  é a contagem corrigida (em cps), observada na janela respectiva, e
- $C$  é a concentração do elemento medida na pista de calibração em terra.

A tabela abaixo corresponde à sensibilidade dos detectores analisados (volume de 33,6 litros e dimensões de 10 cm x 10 cm x 40 cm), tomando por base a altura de vôo de 100m sobre o terreno.

A conversão dos valores de contagem total para  $\mu\text{R/h}$  foi obtida a partir da expressão abaixo (IAEA, 1991):

$$E = 1,505 K + 0,653eU + 0,287eTh, \text{ onde } K, eU \text{ e } eTh, \text{ correspondem às concentrações aparentes destes elementos definidas em terra, quando do levantamento da pista de calibração dinâmica. O valor da concentração determinado para o canal de contagem total foi de } 15,45 \mu\text{R/h.}$$

**Tabela 4.4** - Valores de sensibilidade correspondentes às janelas de interesse.

JANELAS	SENSIBILIDADE
K	57,75 cps / %K
U	4,99 cps / ppm U
Th	3,69 cps/ppm Th
CT	159,30 cps/ $\mu$ R/h CT

### 4.5 - Análise dos Filtros Implementados NASVD e MNF Aplicados a Espectros Brutos

Os dados coletados através de uma linha de vôo (Capítulo III) são dispostos convenientemente em uma planilha no programa OASIS MONTAJ (Figura 4.3). A partir delas são obtidos os intervalos de energias (Janelas U, K,Th e Contagem total) de interesse (Capítulo III), onde se fazem a aplicação dos filtros implementados, o processamento dos dados gamaespectrométricos e a confecção de mapas.

Nestas planilhas os filtros foram aplicados aos espectros brutos (*down*) variando a quantidade de componentes em 4, 8, 16, 32 e 64, gerando 10 espectros filtrados (5 espectros MNF e 5 espectros NASVD), mais 1 espectro resultante da filtragem pelo filtro Passa-Baixa (*Low Pass*). A utilização do filtro Passa-Baixa (*Low Pass*) tem como finalidade a comparação deste com os filtros NASVD e MNF, pois, apesar de ser diferente quanto à maneira de trabalhar, é muito utilizado em processamento.

A primeira etapa é a análise dos espectros brutos em relação aos filtros implementados NASVD e MNF resultantes. Através da comparação de um espectro bruto (*down*) com cada espectro filtrado resultante, pode-se fazer uma inspeção visual dos filtros NASVD e MNF. As Figuras 4.4 e 4.5 mostram comparações entre o espectro bruto e os dados filtrados pelo NASVD e MNF. Podem-se observar as variações entre o resultado dos filtros variando a quantidade de componentes. Quanto maior a quantidade de componentes, mais a curva representativa do espectro filtrado vai se ajustar com o espectro bruto; isto ocorre porque há restauração de quantidades de ruído e sinal remanescentes. As Figuras 4.4 e 4.5 mostram os espectros brutos (vermelho), filtrado NASVD (azul) e filtrado MNF (verde) referentes às componentes 4, 8, 16, 32 e 64, respectivamente. Pode-se verificar que a suavização de cada tipo de filtragem se altera e aproxima do espectro bruto original, ficando nítido nas Figuras 4.4(d) e 4.4(e) no caso do NASVD e das Figuras 4.5(d) e 4.5(e) no caso do MNF.

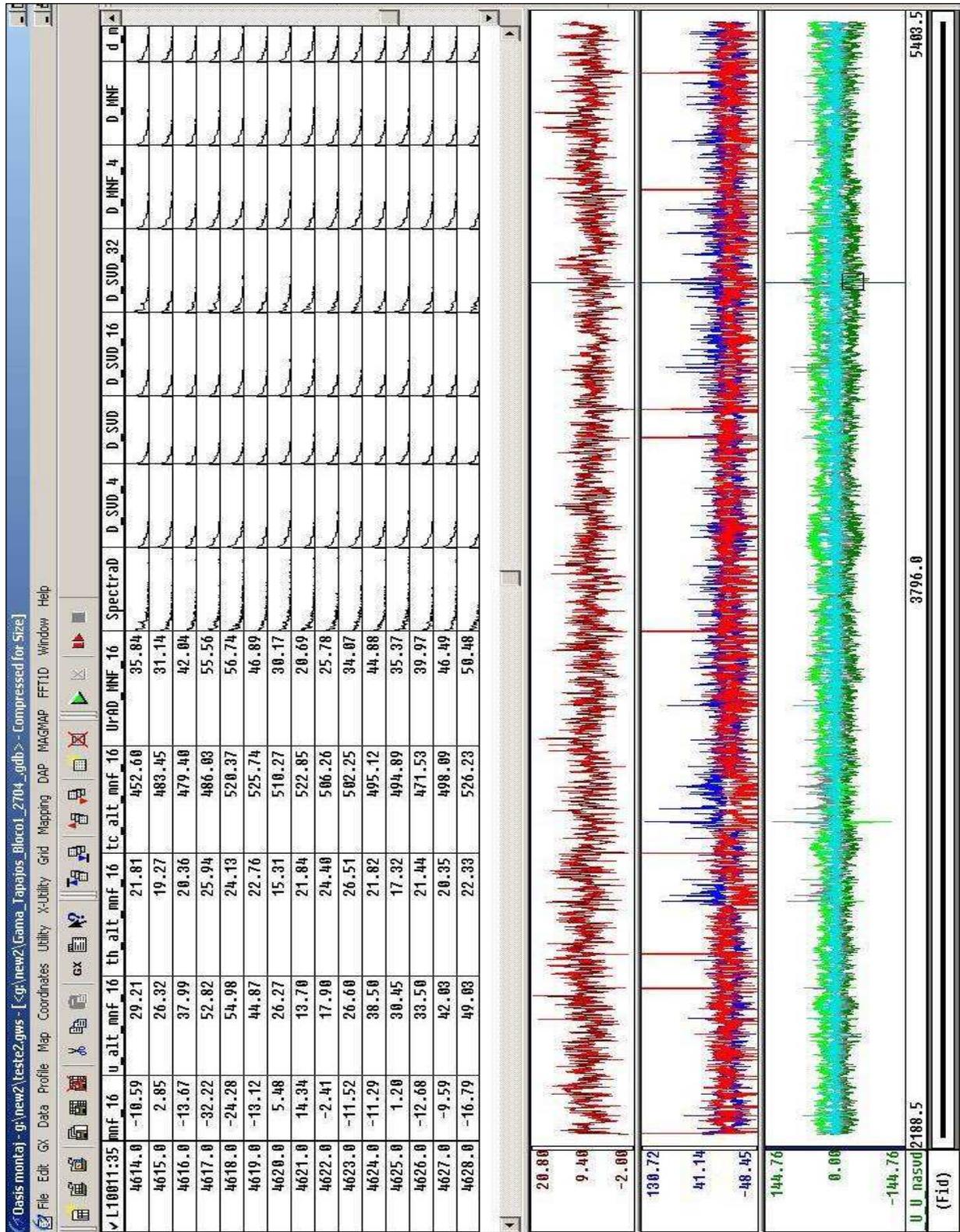


Figura 4.3 - Planilha típica contendo os dados gamaespectrométricos do programa OASIS MONTAJ.

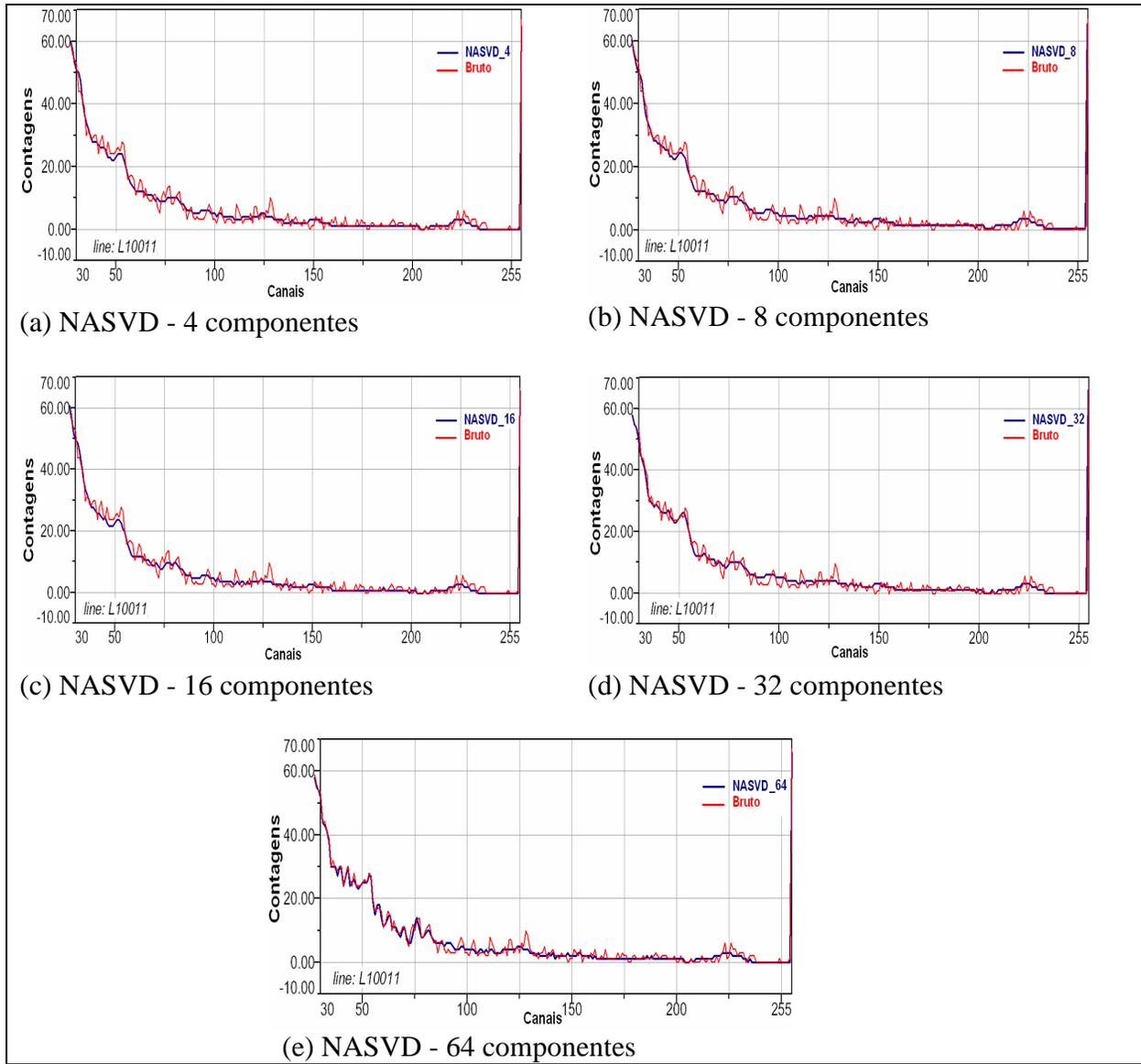


Figura 4.4 - A Figura mostra espectros brutos comparados com os espectros filtrados pelo NASVD, variando a quantidade de componentes (4, 8, 16, 32 e 64 componentes).

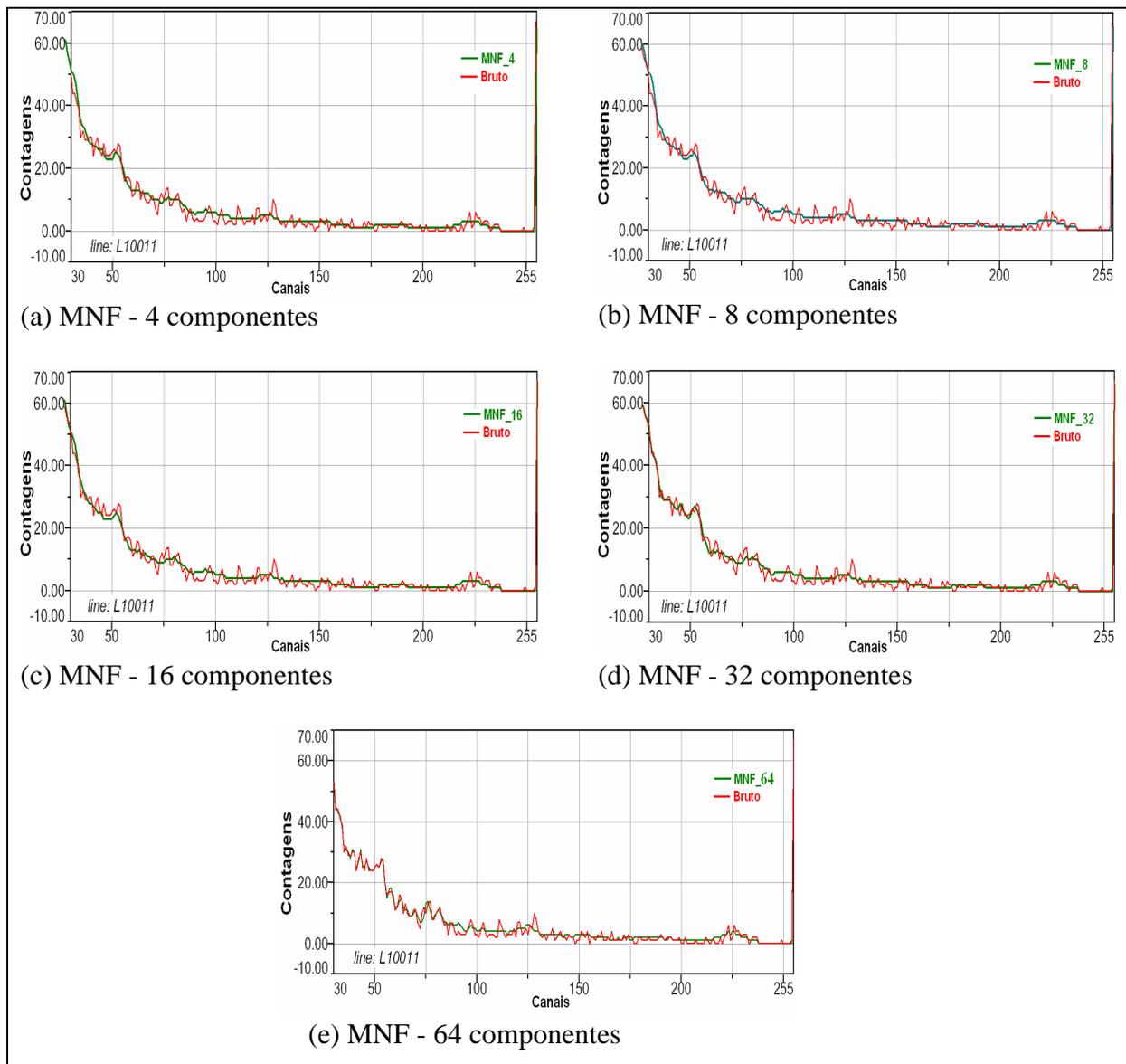


Figura 4.5 - A Figura ilustra os espectros brutos comparados com os filtrados pelo MNF, variando a quantidade de componentes (4, 8, 16, 32 e 64 componentes).

Na segunda etapa efetuou-se uma análise estatística dos espectros filtrados numa tentativa de estabelecer um procedimento de escolha da quantidade de componentes, relacionada com um determinado filtro, para que se possa obter uma filtragem com melhor qualidade.

A diferença entre o espectro bruto e o espectro filtrado representa teoricamente o ruído, mas na prática sempre há um mínimo de sinal residual (Figura 4.6). Todavia, fazendo a média

desta diferença, ela tenderá a zero. Tal tendência poderá, então, servir como parâmetro para indicar qual filtro, com determinada quantidade de componentes, pode ser adotado para a escolha do filtro mais adequado a ser utilizado, podendo assim, dar prosseguimento ao processamento dos dados gamaespectrométricos.

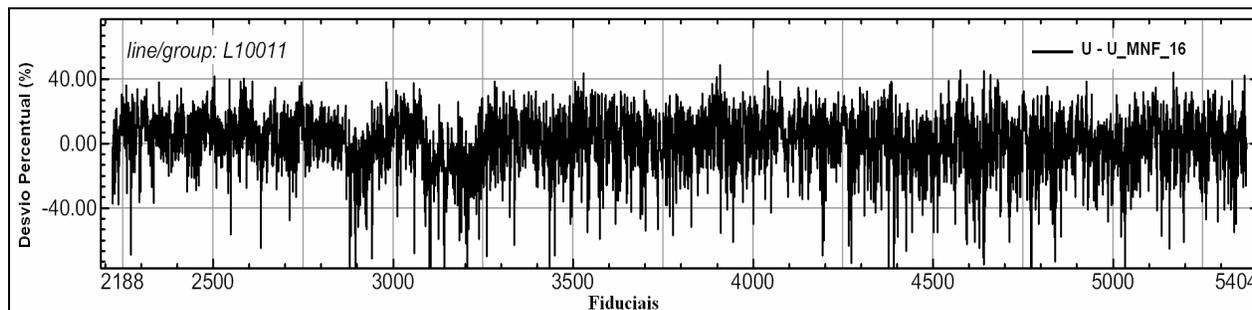


Figura 4.6 - Representação visual da diferença entre  $U_{bruto}$  e  $U_{filtrado}$  com MNF – 16 componentes. O ruído varia dentro de um intervalo cuja média está próxima a zero. Neste caso há sinal, mas de valor inexpressivo (Tabela 4.5).

Esta tendência a zero indica, pelo menos estatisticamente, que quanto maior proximidade de zero menor será a perda de sinal e mais eficiente a filtragem e, conseqüentemente, o filtro implementado.

A diferença entre o espectro bruto e o espectro filtrado fica mais bem representada de forma percentual. Assim esta diferença pode ser da forma:

$$\text{Diferença Percentual} = 100 \times (\text{janela filtrada} - \text{janela Bruto}) / \text{janela Bruto}$$

A expressão matemática apresentada acima foi aplicada para as janelas de Urânio, Potássio e Tório extraídos dos espectros brutos e filtrados (Capítulo III) para todo o banco de dados da área de estudo.

A tabela 4.5 mostra a diferença Percentual do Urânio, Potássio e Tório em relação ao filtro utilizado com seu respectivo desvio padrão. Analisando os dados desta tabela pode-se observar que o filtro MNF possui os menores desvios percentuais em relação ao filtro NASVD, cujos valores de desvios percentuais são os maiores e o filtro Passa-Baixa, aqui representado com finalidade apenas comparativa.

O fato de o filtro NASVD possuir altos valores no diferença Percentual indica que este método não separa o sinal e ruído de forma eficiente em relação ao método MNF, isto é, estes valores indicam que ainda há uma quantidade significativa de sinal residual (Figura 4.13 e 4.14). Mas, este fato não o invalida como filtro, apenas mostra que para este conjunto de dados ele não foi tão eficiente quanto o filtro MNF.

A escolha do filtro e da quantidade de componentes pode ser feita considerando os menores valores de desvios percentuais; porém, isto vai depender muito da experiência do geofísico que está processando os dados gamaespectrométricos.

Numa primeira escolha, os filtros NASVD e MNF com 8 e 16 componentes respectivamente, seriam uma escolha, pois no caso MNF o valor apresentados de diferença Percentual do Urânio é o menor e sendo o canal mais ruidoso, o torna o mais importante numa possível escolha. Apesar do diferença Percentual do Potássio não ser o menor, seu valor de desvio padrão é menor em relação ao valor do filtro MNF com 8 componentes. Quanto ao Tório é o menos afetado pelo ruído e como no processamento usa-se diretamente os dados brutos sem filtragem, este não foi analisado em detalhes. Em relação ao filtro NASVD a escolha é um pouco mais difícil, pois o valor de diferença Percentual é muito alto em relação aos valores do filtro MNF, indicando perda significativa de sinal. Assim, a escolha do filtro NASVD com 8 componentes seria a mais indicada por possuir os menores valores de diferença Percentual para o Urânio e Potássio. O diferença Percentual foi aplicado também ao filtro Passa-Baixa (*Low Pass*) com a finalidade apenas comparativa com os outros filtros. Apesar de a diferença Percentual ser pequeno para o Urânio, fazendo uma inspeção visual do canal filtrado em relação ao bruto (próxima etapa), observa-se uma forte suavização, ocasionando uma significativa perda de sinal. Além disso, os valores de diferença Percentual para o Potássio e Tório possuem valores altíssimos.

O cálculo da diferença entre os dados brutos e filtrados fornece uma forma interessante de estimar a qualidade da filtragem, mas uma inspeção visual dos dados filtrados em relação aos dados brutos também é importante, pois dá a noção da força de suavização do filtro utilizado. Isto pode ser feito perfilando o canal bruto e filtrado de interesse (por exemplo: Urânio) e comparando-os. A Figura 4.7 exemplifica como podem ser analisados visualmente os resultados dos filtros NASVD, MNF e Passa-Baixa (Frequência de corte = 3 fiduciais) em um canal. Esta

---

## CAPÍTULO IV – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS NASVD E MNF

Figura mostra o canal Urânio bruto (vermelho) e filtrado (azul) de uma linha inteira de vôo. Também mostra amplificação (zoom) de um intervalo de dados (retângulo) para melhor visualização da suavização resultante de um filtro nos dados brutos.

**Tabela 4.5** - Diferença Percentual das janelas de interesse em relação aos filtros NASVD, MNF e Passa-Baixa, variando-se a quantidade de componentes.

	Urânio	$\sigma_U$	Potássio	$\sigma_K$	Tório	$\sigma_{Th}$
NASVD_4	24,64	18,28	13,54	18,68	30,33	30,22
NASVD_8	23,93	17,58	13,34	15,76	32,10	30,24
NASVD_16	23,96	17,30	13,56	15,60	33,03	28,50
NASVD_32	24,11	16,11	14,67	13,05	34,25	25,00
NASVD_64	24,15	15,34	16,02	8,65	36,03	23,10
MNF_4	1,48	20,01	1,10	18,03	8,31	39,64
MNF_8	0,75	20,08	0,78	18,04	5,98	37,89
MNF_16	0,68	20,06	0,99	17,76	4,59	37,89
MNF_32	0,70	19,18	2,10	14,48	2,24	28,30
MNF_64	1,50	15,71	3,46	8,40	0,58	22,71
LOW PASS	1,91	13,96	78,14	28,14	56,37	30,96

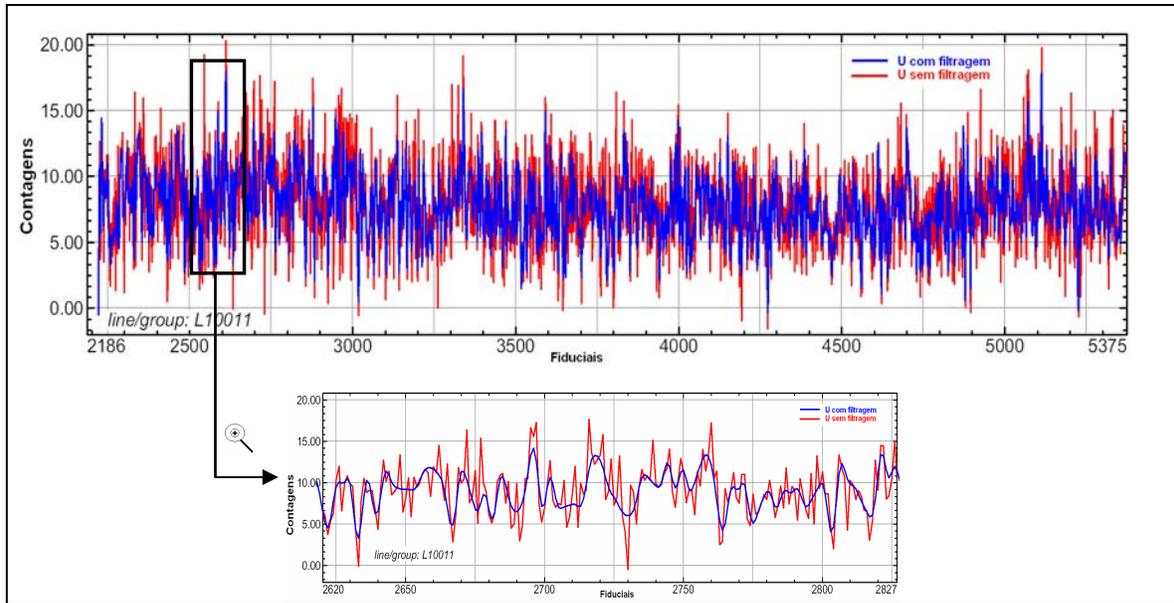


Figura 4.7 - Perfil do canal de Urânio típico com e sem filtragem e a representação de um intervalo ampliado em algumas vezes.

A terceira etapa foi analisar, visualmente, o efeito do filtro Passa-Baixa (Frequência de corte = 3 fiduciais) em dados brutos de Urânio, Potássio e Tório e comparando-os com seus dados brutos. Observando os perfis pode-se ver que a suavização é muito forte, havendo perda de informações de forma expressiva (Figura 4.8). Da mesma forma pode-se analisar o produto das filtragens NASVD e MNF no canal Urânio, Potássio e Tório e compará-los com os respectivos canais brutos. A Figura 4.9 mostra os canais brutos (vermelho) do Urânio, Potássio e Tório, os respectivos canais filtrados pelo NASVD (azul) e MNF (verde). Neste caso, pode-se observar que a suavização está ajustada em relação aos dados brutos, ou seja, houve atenuação do ruído sem excessiva perda de sinal.

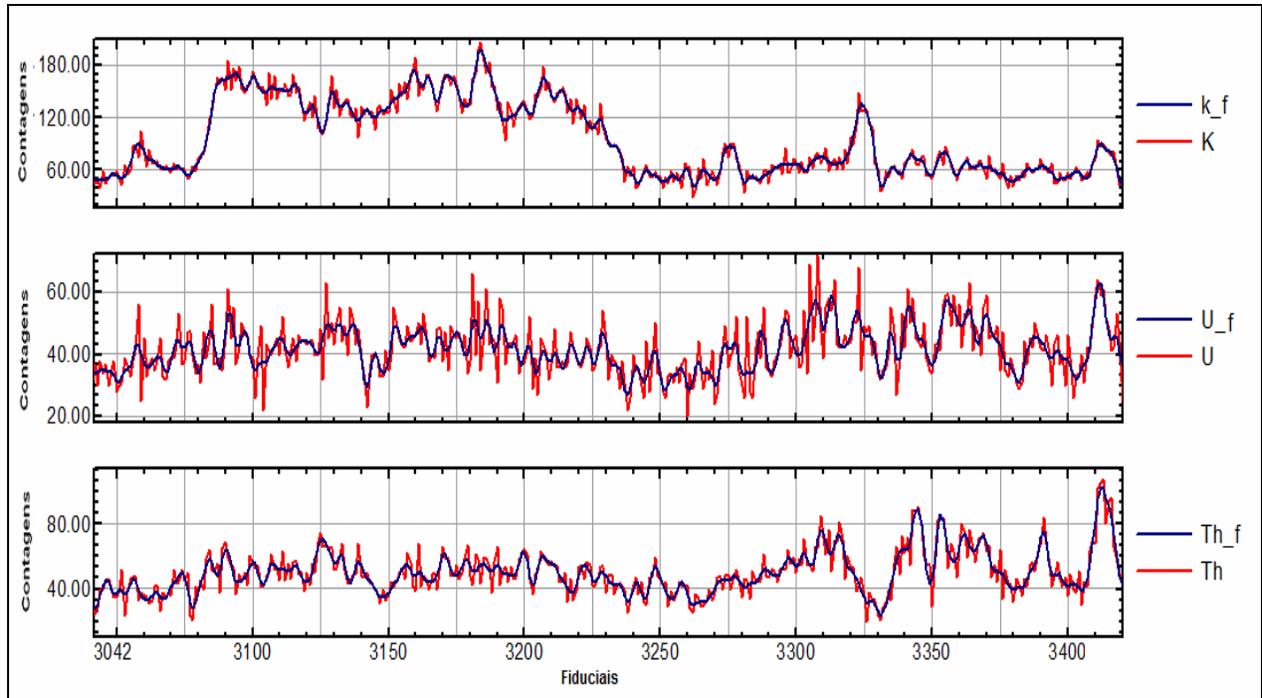


Figura 4.8 - Comparação entre U, K e Th brutos e os mesmos filtrados pelo Passa-Baixa (Low Pass) - - 3 fiduciais (frequência de corte).

A etapa final concentrou-se na confecção de mapas, basicamente do Urânio e Potássio, dos dados gamaespectrométricos filtrados ou não e pós-processados. Do total de mapas elaborados alguns foram selecionados e agrupados de forma a facilitar a análise visual dos resultados. No primeiro grupo (Figura 4.10) foi analisada a atuação do filtro Passa-Baixa em duas situações: com 3 e 5 fiduciais (frequência de corte) e comparado ao mapa que representa os dados brutos. É importante ressaltar que este procedimento é rotineiro no processamento dos dados gamaespectrométricos, portanto, esta análise é fundamental para delinear as características dos produtos gamaespectrométricos. Este procedimento consiste em aplicar o filtro passa baixa, cuja consequência é o corte de altas frequências; a intensidade depende do parâmetro de corte (frequência de corte), que para este conjunto de dados corresponde a 3 e 5 fiduciais. Este atua suavizando picos, atingindo sinal e ruído sem distinção (Figura 4.8).

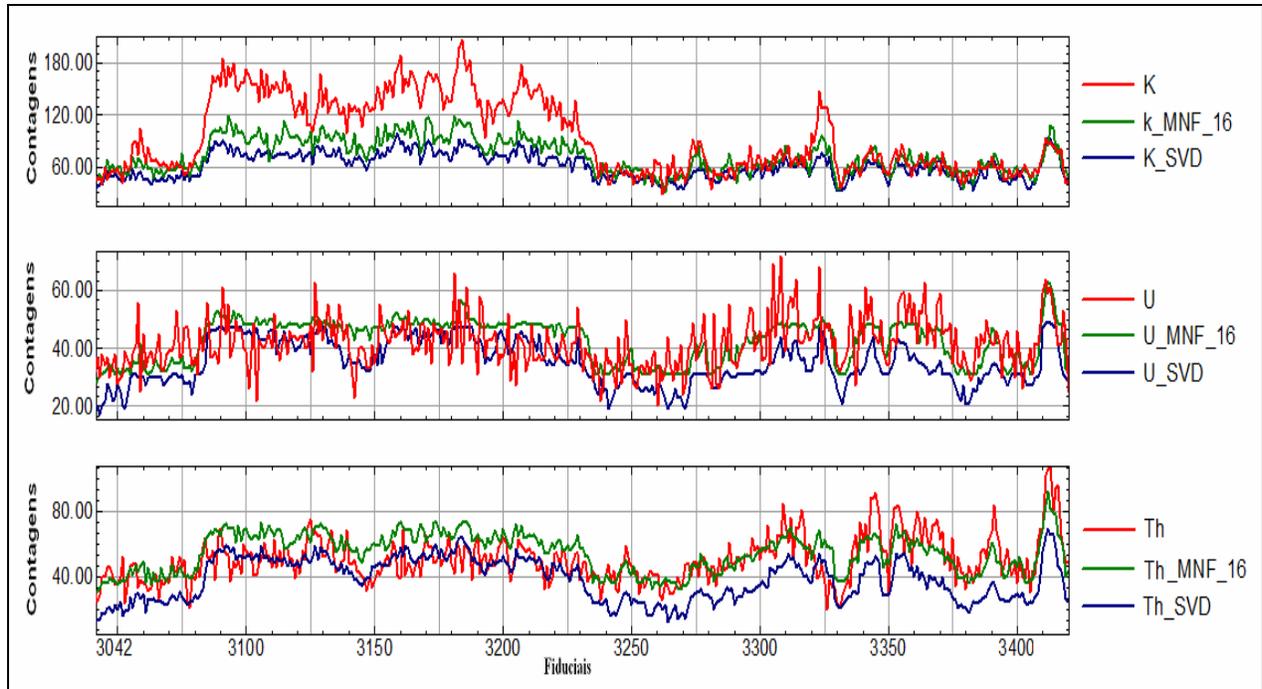


Figura 4.9 - Comparação entre U, K e Th brutos e os mesmos filtrados pelo MNF (16 componentes) e NASVD (8 componentes).

A Figura 4.10 mostra em detalhe (retângulo branco) a ampliação das mesmas feições dos mapas do Urânio bruto (a), Passa-Baixa com 3 (b) e 5 fiduciais (c). Pode-se observar que as feições (anomalias) em geral, mais explicitamente as assinaladas nos círculos brancos “A” e “B”, ficam mais bem detalhadas com filtro Passa-Baixa com 3 fiduciais em relação ao mapa de Urânio bruto e o filtrado com 5 fiduciais. Destes foi adotado o mapa filtrado com Passa-Baixa - 3 fiduciais - como padrão para se fazer comparações com os mapas resultantes das filtragens MNF e NASVD.

Seguindo a escolha feita através da tabela 4.5, os mapas de Urânio correspondentes aos filtros NASVD e MNF (2º grupo de mapas) com 8 e 16 componentes, respectivamente, foram colocados lado a lado e comparados aos mapas de Urânio bruto e filtrado com Passa-Baixa com 3 fiduciais. A Figura 4.11 mostra os mapas de Urânio pós-processados sem filtragem (a), NASVD (b), Passa-Baixa (c) e MNF (d). Também mostra uma área selecionada (retângulo branco) e ampliada onde foram assinaladas feições (anomalias) em círculos pretos e identificados pelas letras “A”, “B”, “C” e “D”, onde se pode observar o aumento do ganho na resolução; conseqüentemente, os contornos destas anomalias ficaram mais bem definidos nas Figuras

4.11(b) – filtro NASVD e 4.11(d) – filtro MNF em relação às Figuras 4.11(a) – sem filtragem e 4.11(c) – Passa-Baixa.

As áreas selecionadas apenas exemplificam detalhes da perda ou ganho de resolução, dependendo do tipo de filtro aplicado. Como visto anteriormente, pode-se analisar através da tabela 6.5 o diferença Percentual de cada filtro em relação ao conjunto de dados estudado, porém é interessante visualizar esta diferença em forma de mapa. Assim, a Figura 4.12 (3º grupo) mostra 3 mapas das diferenças entre o Urânio bruto (sem filtragem) pós-processado com os filtros Passa-Baixa (a), MNF – 16 componentes (b), NASVD (c) – 8 componentes (c). Estes mostram basicamente o ruído subtraído pelos filtros. Todavia, inspecionando com cuidado os mapas pode-se observar claramente que há nos mapas da Figura 4.12(b) e 4.12(c) a existência de sinal em áreas localizadas, áreas assinaladas em círculo preto e identificadas por “A” e “B”, sendo que a quantidade de sinal remanescente depende do número de componentes utilizados pelo filtro. Mas no caso do filtro Passa-Baixa, Figura 4.12(a), o sinal é distribuído através de todo o mapa, isto é, ele é encontrado em toda a sua extensão demonstrando de forma visual que o efeito deste filtro é muito forte, isto é, cortando (subtraindo) acima de um determinado valor indistintamente tanto ruído como sinal, como já visto em perfil na Figura 4.8. Quanto aos mapas das Figuras 4.12(b) e 4.12(c), eles mostram visualmente que a segregação entre o sinal e o ruído foi efetivada. Além disso, a análise destes mapas, é importante para o aumento ou a diminuição da quantidade de componentes utilizadas, conforme a feição que se procura. De novo, frisando que esta escolha depende da experiência do geofísico processador.

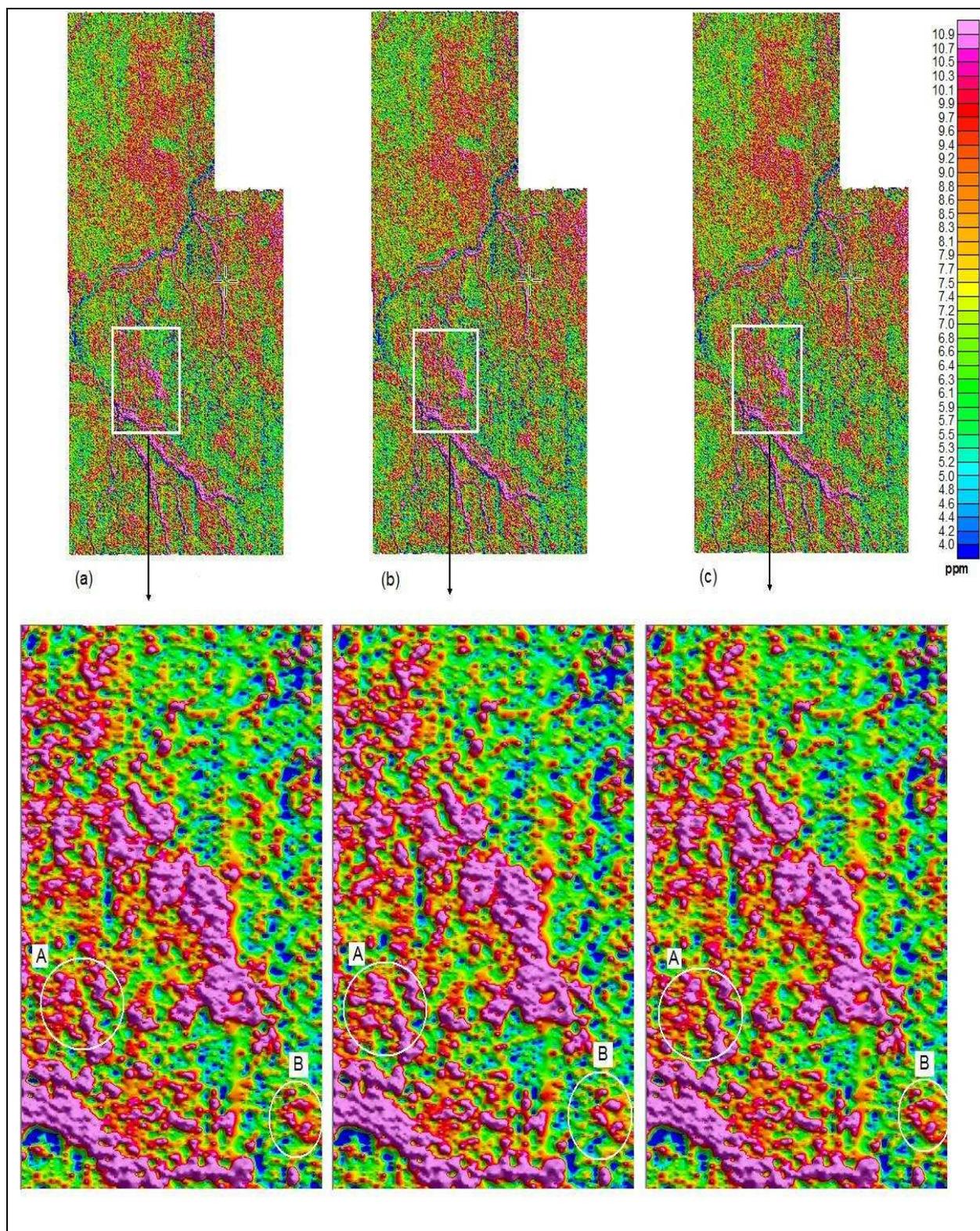


Figura 4.10 - Mapas do Urânio pós-processado: (a) sem filtragem, (b) Passa-Baixa – 3 fiduciais, (c) Passa-Baixa – 5 fiduciais (Frequência de corte).

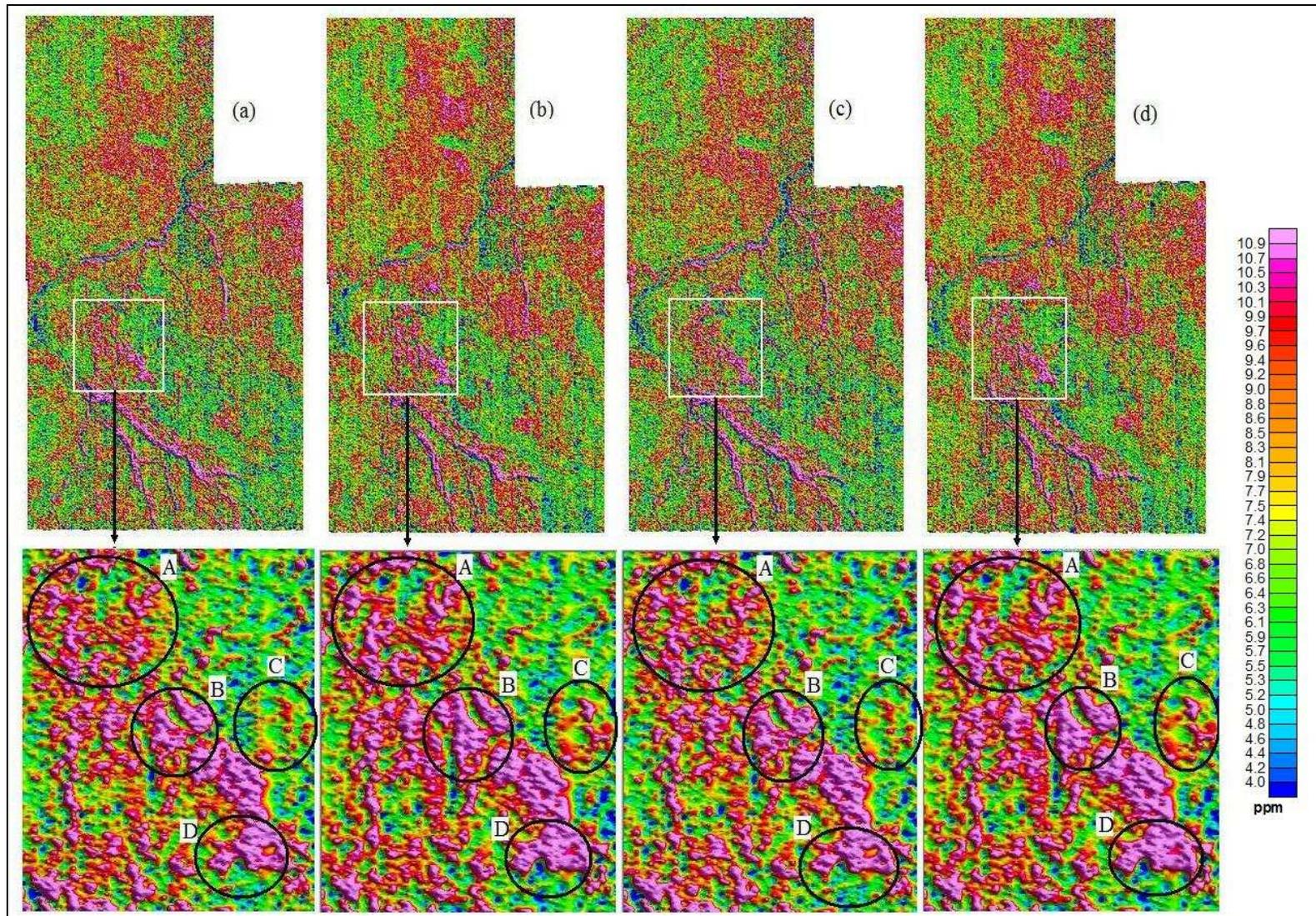


Figura 4.11 - Mapas de Urânio pós-processados: (a) sem filtragem, (b) filtragem NASVD com 8 componentes, (c) filtragem com Passa-Baixa (Low Pass) – 3 fiduciais (frequência de corte) e (d) filtragem MNF com 16 componentes com suas respectivas áreas em detalhamento e ampliada

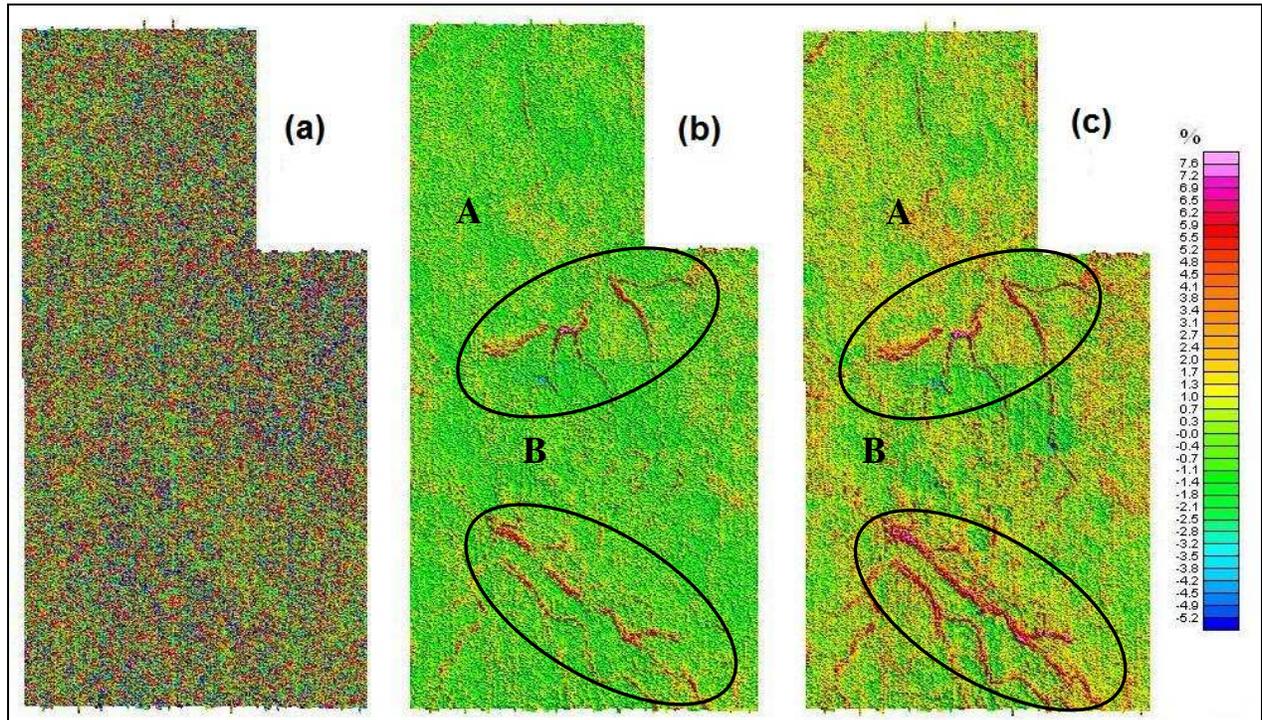


Figura 4.12 - Mapas das diferenças entre Urânio bruto pós-processado com os filtros Passa-Baixa – 3 fiduciais (a), MNF – 16 componentes (b), NASVD – 8 componentes (c).

De forma análoga fez-se a mesma análise com os mapas do Potássio (4º grupo) utilizando a Tabela 6.5 para escolher os filtros com menor diferença Percentual. A Figura 4.13 mostra mapas de Potássio pós-processados escolhidos: sem filtragem (a), filtragem NASVD - 64 componentes (b), filtragem Passa-Baixa – 3 fiduciais (Frequência de corte) (c) e filtragem MNF - 8 componentes (d) com suas respectivas áreas em detalhamento e ampliadas.

O Potássio tem baixa energia em relação ao Urânio e Tório, sendo mais suscetível ao ruído. Observando os valores de diferença Percentual do filtro MNF e NASVD na Tabela 6.5 escolheu-se o filtro com 16 e 64 componentes, respectivamente. O valor de diferença Percentual escolhido do MNF é o segundo menor (o menor é MNF - 8 componentes), mas este valor está bem próximo daquele e possui desvio padrão menor. Esta escolha seguiu a mesma lógica de escolha utilizada para o Urânio.

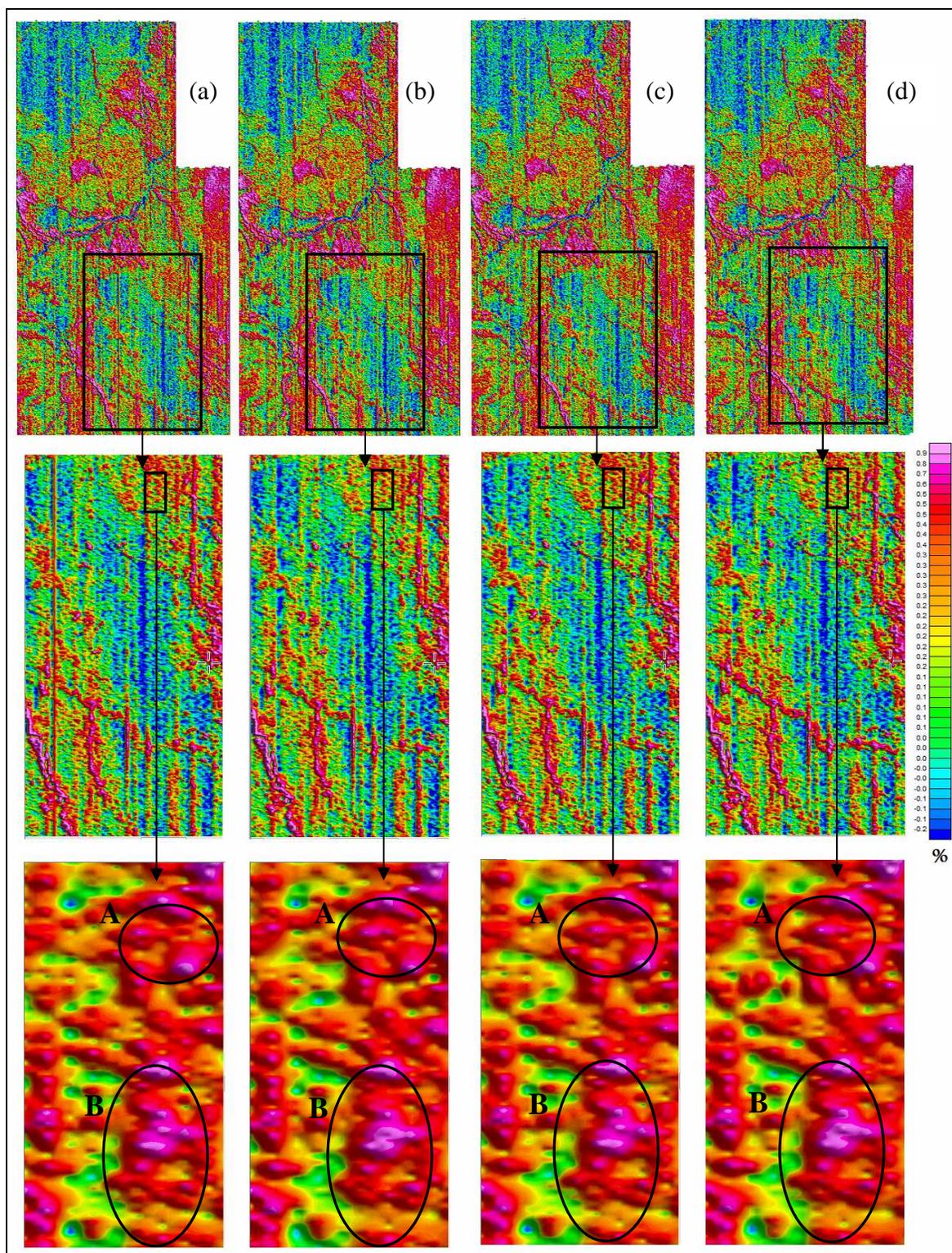


Figura 4.13 - Mapas de Potássio pós-processados: (a) sem filtragem, (b) filtragem NASVD - 64 componentes, (c) filtragem Passa-Baixa – 3 fiduciais (frequência de corte) e (d) filtragem MNF - 8 componentes com suas respectivas áreas em detalhamento e ampliada.

Quanto ao filtro NASVD, segue o mesmo padrão em relação ao Urânio, possuindo valores altos de diferença Percentual, o que significa que a interface de separação sinal / ruído não está bem definida para este conjunto de dados. Uma segunda escolha é o filtro NASVD com 64 componentes, pois tem um desvio padrão menor, apesar de possuir o maior valor de diferença Percentual.

Este fato, como já dito anteriormente, não inviabiliza o filtro NASVD e o procedimento de escolha por diferença Percentual apenas requer um estudo mais detalhado com várias áreas conhecidas, tanto na Geologia quanto na gamaespectrometria. Todos os mapas resultantes da filtragem com NASVD com 4, 8, 16, 32 e 64 componentes foram analisados à conclusão de que o filtro com 64 componentes realmente é o que possui a melhor resolução.

Analisando a Figura 4.13 podem-se perceber as diferenças na resolução das feições (anomalias) com maior detalhamento nas imagens ampliadas de pequenas áreas. As imagens ampliadas que foram filtradas com o MNF e NASVD (detalhamento mostrado no círculo preto denominados “A” e “B”) destacam-se, pois apresentaram o maior ganho em resolução nas imagens correspondentes aos não filtrado e filtrado pelo Passa-Baixa. Repetindo o procedimento como efetuado com os mapas de Urânio, fizeram-se os mapas de diferenças entre os produtos filtrados com o mapa de Potássio bruto pós-processado (5º grupo). A Figura 4.14 mostra estes mapas. Os mapas da Figura 4.14(b) e 4.14(c) mostram basicamente ruídos, tendo valores muito próximos a zero e que a quantidade de sinal remanescente é muito pequena.

Porém, a Figura 4.14(a) mostra uma visualização muito parecida com a do Urânio. A quantidade de sinal é mais expressiva que a dos outros filtros e está distribuído por toda a área estudada, demonstrando que seu efeito foi muito forte, ou seja, o sinal foi excessivamente cortado.

Todos os mapas dos filtros escolhidos ainda terão que passar por nivelamento (efeitos visuais aparentes no sentido norte-sul), mas esse processo será muito facilitado com a atuação dos filtros MNF e NASVD, porque tais filtros minimizam estes efeitos.

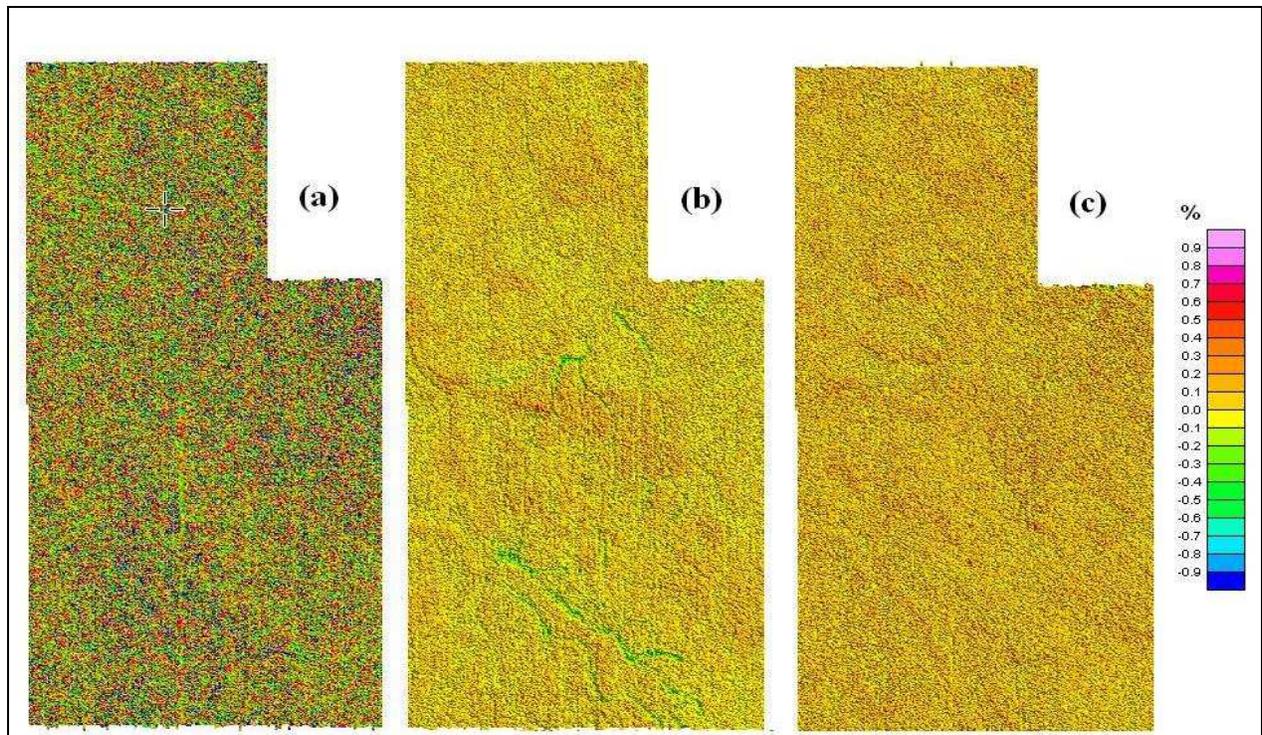


Figura 4.14 - Mapas das diferenças entre Potássio bruto pós-processado com os filtros Passa-Baixa (a), MNF – 8 componentes (b), NASVD – 64 componentes (c).

### CAPÍTULO V – CONCLUSÃO

#### 5 - CONCLUSÃO

Os filtros MNF e NASVD atuam utilizando a estatística como alicerce, mostraram ser alternativa bastante promissora como ferramentas de auxílio no processamento de dados gamaespectrométricos.

O destaque é que o filtro MNF conseguiu ter uma atuação muito mais satisfatória que o procedimento usual e que o filtro NASVD. O resultado apresentado por este filtro mostra, através dos perfis e mapas, que com certeza os produtos finais terão uma sensível melhora em resolução e, conseqüentemente, melhor qualidade.

Quanto ao filtro NASVD, apesar de apresentar um resultado bom, ainda precisa ser mais bem estudado, aplicando-o em varias áreas com cobertura conhecida em aerolevanteamento e geologia, pois, apesar de se conseguir minimizar o ruído e melhorar a qualidade dos mapas, o resultado ficou abaixo do esperado, necessitando, portanto, de melhor investigação. Mas este fato não o inviabiliza, apenas indica que ele deve ser melhor estudado, talvez alterando a forma de aplicação, como sugerido em algumas publicações que fazem uso de agrupamentos (por exemplo: DICKSON & TAYLOR, 1998).

Outro aspecto é o da escolha do filtro a ser utilizado. Apesar deste trabalho sugerir um procedimento de escolha da quantidade de componentes através de diferenças entre os dados brutos e dados filtrados, é importante deixar bem claro que decisões a serem tomadas dependem, e muito, da experiência do geofísico que está processando, ampliando o leque de opções que ele possa utilizar.

Portanto, os resultados descritos neste trabalho demonstram que os filtros NASVD e MNF são alternativas que contribuirão, de forma positiva, na melhoria da qualidade dos produtos finais.

CAPITULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M.E.; Reis, C.C. **Geologia de reconhecimento dos garimpos Serra Verde, Columbita, Garimpinho, Conceição, Cantagalo, Centrinho (Fo lha SB.21-Y-B), Abacate, Modelo e 21 de Julho (Fo lha SB.21-Z-D), Província Mineral do Tapajós, Estado do Pará. Manaus: CPRM- Serviço Geológico do Brasil, 1998. 12 p.** (Relatório de viagem).
- Almeida, M.E.; Ferreira, A.L.; Brito, M.F.L.;Monteiro, M.A.S. **Proposta de evolução tectono estrutural para a região do alto-médio curso do rio Tapajós (Estados do Pará e Amazonas).** In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 6,Manaus, 1999b. Boletim de resumos expandidos. Manaus-AM: SBG, 1999, p. 297-300.
- Bahia, R.B.C.e Quadros, M. L. E. S. (organizadores), 2000. **Projeto Especial Província Mineral doTapajós.** PROMIN Tapajós. Geologia e recursos minerais da Folha Caracol - SB.21-X-C. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Nota Explicativa, Brasília: CPRM, 53p.
- CPRM, - acessado: julho/2008 - Projeto Aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós. <ftp://ftp.cprm.gov.br/pub/pdf/tapajos/promin.html>.
- Dickson, B. L.; Scott, K. M. 1997. **Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors.** AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, Austrália, v.17, n. 2, p. 187-200.
- Dickson, B & Taylor, G, 1998. **Noise reduction of aerial gamma-ray surveys.** Exploration Geophysics 29, 234-329.
- Dickson, B & Taylor, G, 1999. **Why the maximum noise fraction (MNF) method cleans gamma-ray surveys so well.** Preview, june 1999, 14-17.
- Dickson, B & Taylor, G, 2000. **Maximum noise fraction method reveals detail in aerial gamma-ray surveys.** Exploration Geophysics 31, 73-77.
- Gilmore, G. and Hemingway, J., 1995, **Practical Gamma-Ray Spectrometry.**
- Grasty, R. L. & Hovgaard, J. - 1996 - **The calibration of upward looking detectos in gamma ray surveys.** SEG, 66 Annual Meeting Expanded Abstracts, L.A., USA.

- Green, A. A., Berman, M. Switer, P & Craig, M.D., 1988. **A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal.** IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, GE-26, 65-74.
- Hovgaard, J., 1997a. **A new processing method for airborne gamma-ray spectrometer data (noise adjusted Value Decomposition).** Am. Nucl. Soc. Sixth Topical Meeting on Emergency Preparedness and Response, 123-127.
- Hovgaard, J., 1997b. **Airborne Gamma-ray Spectrometry. Statistical Analysis of Airborne Gamma-ray Spectra.** Ph.D.-thesis, Department of Automation, Technical University of Denmark.
- Hovgaard, J. & Grasty, R.L., 1997. **Reducing statistical noise in airborne gamma-ray data through spectral component analysis.** In Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration, (ed. A.G. Gubins), 753-764.
- IAEA, 1991. **Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying.** Technical reports series No. 323, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Kaplan, I. 1978. **Física Nuclear**, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 2a edição.
- LASA, E.P, 1998, **Relatório Final do Lavantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos: Projeto Aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós – Bloco I e II**, volume I – texto técnico.
- Leo, W. R., 1994, **Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments.**
- Mauring, E & Smethurst, M, A., 2005. **Reducing noise in radiometric multi-channel data using noise-adjusted singular value decomposition (NASVD) and maximum noise fraction (MNF).** NGU Report 2005.014, pp. 14.
- Minty, B. R. S., 1997. **Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry.** AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17, n.2, p.39-50.
- Minty, B. R. S., 2000. **Reducing Noise in airborne Gamma-ray Spectra.** AGSE Preview - december 2000, p.35-41.
- Minty, B. & McFadden, P., 1998. **Improved NASVD smoothing of airborne gamma-ray spectra.** Exploration Geophysics 29, 516-523.
- Noble, B, James W. D., 1977. **Álgebra Linear Aplicada**, Ed. Prentice-Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, capítulo 9.
-

- Santos, J.O.S.; Hartman, L.A.; Gaudette, H.E, 1997. **Reconnaissance U/Pb in zircon; Pb/Pb in sulfides and review of Rb/Sr geochronology in the Tapajós Gold Province; Pará/Amazonas States, Brazil.** In: South-American Symposium on Isotope Geology-Brazil. Campos do Jordão, 280-282.
- Silva, N. C., 2002, acessado: 2008. **Detecção da radiação nuclear.**  
<http://fsc.ufsc.br/~canzian/labfismod/radiacaonuclear.html>
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 1999. **Geochronological provinces of the Amazonian craton.** Episodes 22 (3), 174–182.
- Telford, W. M. et al., 2001. **Applied Geophysics.**Cambridge: Cambridge University Press. 860 p.
- Thomson, S., Fountain, D., Watts, T., 2007. **Airborne Geophysics – Evolution and Revolution.** Leading Edge, p 19 -37.
- Urquhart, W.E.S, acessado: 2008, **Airborne Gamma-Ray Spectrometry Surveys**  
[http://www.geoexplo.com/airborne\\_survey\\_workshop\\_rad.html](http://www.geoexplo.com/airborne_survey_workshop_rad.html).