UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**FILTROS DE CONVOLUÇÃO PASSA BAIXAS
NO REALCE TONAL DE IMAGENS**

Fábio Cardinale Branco

Orientador: Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
1998

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FILTROS DE CONVOLUÇÃO PASSA BAIXAS NO REALCE TONAL DE IMAGENS

FÁBIO CARDINALE BRANCO

Orientador: Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

Nome

Assinatura

Presidente: Prof. Dr. Teodoro Isnard R. de Almeida

Teodoro Isnard R. de Almeida

Examinadores: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Carlos R. S. Filho

Prof. Dr. Raimundo Almeida Filho

Raimundo Almeida Filho

SÃO PAULO
1998

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**FILTROS DE CONVOLUÇÃO PASSA BAIXAS
NO REALCE TONAL DE IMAGENS**

Fábio Cardinale Branco

Orientador: Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

DEDALUS - Acervo - IGC

30900004649

SÃO PAULO
1998

Sumário:

Sumário	i
Sumário de Figuras	iv
Resumo	vii
Abstract	viii
Agradecimentos	ix
I Introdução e Objetivos	1
II Localização e Geologia da Área de Testes	3
II.1 Esboço da geologia regional	3
III Trabalhos Anteriores	8
III.1 Filtragem por convolução	11
III.2 Filtros passa baixas	12
III.3 Filtros passa altas	15
III.3.1. Método da subtração da imagem:	16
III.3.2. Métodos derivativos:	17
IV Materiais e Métodos	23
IV.1 Método para a geração dos filtros isotrópicos passa altas	23
IV.2 Método para a geração dos filtros isotrópicos passa baixas	27

IV.3 Ensaaios realizados	29
IV.3.1 Testes em imagem didática	30
IV.3.2 Aplicação na área de testes	32
IV.4 Produção do mapa fotogeológico	33
V Resultados Obtidos	34
V.1 Verificação das premissas básicas	34
V.2 Testes quantitativos	34
V.2.1 Análise de correlação	34
V.2.2 Perfis de DN's	38
V.3 Testes qualitativos	42
V.3.1 Imagem didática	42
V.3.1.1 Filtros passa baixas	42
a) Aumento linear de contraste	42
b) Aumento logarítmico de contraste	44
c) Aumento exponencial de contraste	46
d) Aumento de contraste por normalização de histograma	47
e) Aumento de contraste por equalização de histograma	49
V.3.1.2 Filtros passa altas	51
V.3.2 Aplicação na área de testes	53
VI. Análise do Mapa Fotogeológico	66

VII Limitações do Enfoque Proposto	70
VIII Conclusões	73
IX Referências Bibliográficas	74
Anexos	

Índice de figuras:

Nº da figura	Título da figura	Página
1	Localização da área de testes	4
2	Mapa geológico da área de testes	6
3	Decomposição do perfil de variações tonais de uma imagem genérica em curvas senoidais	8
4	Comparação entre os efeitos produzidos por filtragens passa altas e passa baixas em uma sequência de dados unidimensional	9
5	Exemplo de uma série unidimensional de dados, mostrando o efeito da aplicação de um filtro passa baixas de média móvel de 3 células	12
6	Exemplo de operador unidimensional passa baixas, de média móvel	13
7	Exemplos de operadores passa baixas	14
8	Exemplo de uma série de dados unidimensional, mostrando o efeito da aplicação de um filtro passa altas de 3 células	16
9	Exemplo de operador unidimensional	17
10	Obtenção de um operador passa altas a partir de um operador passa baixas de média móvel	17
11	Exemplo de soma vetorial para cálculo da primeira derivada dos DNs em função da posição em uma imagem	18
12	Operador Laplaciano calculado segundo Mather (1995), e o operador passa altas "imagem menos Laplaciano"	20
13	Exemplos de operadores passa altas	20
14	Modelo para cálculo do operador proporcional	23
15	Operador calculado de forma proporcional às distâncias do centro	24
16	Sentido de crescimento dos valores (em módulo) em um operador proporcional de 13x13 células	24
17	Valores calculados para um operador de 13 por 13 células	25
18	Cálculo de um operador proporcional passa baixas a partir de um operador proporcional passa altas	27
19	Obtenção do operador passa baixas proporcional sem o fator de escalamento	28
20	Gráfico relacionando o número de células do operador e o grau de correlação entre a imagem filtrada e a imagem original	36

Nº da figura	Título da figura	Página
21	Diagramas de dispersão mostrando a correlação existente entre a imagem TM3 e a mesma imagem filtrada com operadores passa baixas de 31x31 e de 255x255 células	37
22	Diagramas de dispersão mostrando a correlação existente entre a imagem PC4 e a mesma imagem filtrada com operadores passa baixas de 31x31 e de 101x101 células	37
23	perfis de DN's da banda TM4 filtrada com operador passa baixas de 65x65 células e original	39
24	Perfis de DN's da primeira componente principal	40
25	Perfis de DN's da quarta componente principal	41
26	Imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento linear de contraste	43
27	Imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento logarítmico de contraste	44
28	Ampliação da figura 27 na porção do topo da chama	45
29	Imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento exponencial de contraste	47
30	Imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento de contraste por normalização de histograma	48
31	Imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento de contraste por equalização de histograma	49
32	Ampliação da figura 31 na porção do topo da chama	50
33	Ampliação da figura 31 na porção da base da chama	51
34	Imagens da chama de uma vela com a aplicação de filtro passa altas proporcional, todas com aumento de contraste por equalização de histograma	52
35	Ampliação da figura 34 na porção do topo da chama	53
36	Imagens dos arredores das minas do Camaquã	54
37	Imagens da banda TM4 dos arredores da Mina do Camaquã	55

Nº da figura	Título da figura	Página
38	Imagens da banda TM4 dos arredores da Mina do Camaquã, com e sem a aplicação de filtros passa baixas	56
39	Composição TM4R/TM3G/TM7B da área de testes, sem filtragens, com adição da primeira componente principal no canal de intensidade	60
40	Composição TM4R/TM3G/TM7B da área de testes com aplicação de filtros passa baixas de 65x65 células nas três bandas, com adição da primeira componente principal, sem filtragem, no canal de intensidade	61
41	Composição PC1R/PC2G/PC4B da área de testes, sem filtragens, com adição da primeira componente principal no canal de intensidade	63
42	Composição PC1R/PC2G/PC4B da área de testes com aplicação de filtros passa baixas de 31x31 células nas três bandas, com adição da primeira componente principal, sem filtragem, no canal de intensidade	64
43	Composição PC1R/PC2G/PC4B da área de testes com aplicação de filtros passa baixas de 101x101 células nas três bandas, com adição da primeira componente principal, sem filtragem, no canal de intensidade	65
44	Mapa fotogeológico	69
45	Relação entre o número de células do operador e o tempo de processamento necessário	71

Resumo

O trabalho apresenta os resultados de estudo metodológico, com o desenvolvimento de filtros de convolução do tipo passa baixas para o realce de informações tonais de imagens de uma forma geral ou, especificamente, de imagens de sensoriamento remoto óptico, onde as informações tonais relacionam-se às respostas espectrais dos materiais superficiais.

A técnica baseia-se no conceito de que, considerando que uma filtragem passa altas exclui a informação tonal da imagem, esta deve estar presente no resíduo da filtragem passa altas, ou seja, deve estar relacionada às baixas frequências, podendo ser realçada por filtros passa baixas.

Inicialmente foram desenvolvidos filtros do tipo passa altas, cujos valores atribuídos à células do operador são ponderados em função da distância de cada célula ao centro do operador. A partir dos filtros assim elaborados (denominados "filtros passa altas ponderados"), foram desenvolvidos os filtros passa baixas.

Ambos filtros foram aplicados inicialmente em uma imagem didática, de extrema simplicidade, para avaliar os efeitos obtidos e relacioná-los às feições de borda (passa altas) ou às informações tonais (passa baixas).

A imagem escolhida para tais testes foi a fotografia digitalizada da chama de uma vela, a qual apresenta os atributos básicos para uma avaliação objetiva dos filtros.

Finalmente, os filtros foram aplicados a uma imagem TM-Landsat, o que permitiu avaliar o comportamento das filtragens em um caso prático de aplicação de sensoriamento remoto voltado às geociências.

Para tal, foi escolhida a imagem da região das Minas do Camaquã, RS, área previamente trabalhada com sucesso por meio de sensoriamento remoto orbital, acompanhada de extenso controle de campo, fornecendo elementos seguros para avaliar a metodologia empregada.

Considerando que o presente trabalho não apresenta como objetivo refazer o mapeamento da região das Minas do Camaquã, não foram feitos trabalhos de campo, mas apenas comparados os resultados obtidos pela interpretação das imagens previamente tratadas com a metodologia proposta com os trabalhos de mapeamento já realizados na área, em especial com aqueles que utilizaram como ponto de partida imagens TM-Landsat.

Abstract

The present work presents the results of a methodological study, which led to the development of convolution filters of the "low pass" type. Such filters enable the enhancement of the tonal information of an image which, in the more specific case of optical remote sensing images, is related to spectral responses from superficial materials.

The technique is based on the concept that, since "high pass" filtering excludes the tonal information of an image, it must remain in the "high pass" filtering residue, that is, it must be related to low frequencies and may be enhanced by "low pass" filters.

Initially, filters of the "high pass" type were developed whose values, assigned to operator cells, were weighted as a function of the distance of each cell to the operator center. From filters thus elaborated (named weighted "high pass" filters), "low pass" filters were developed.

Both filters were initially applied to an extremely simple sample image, to evaluate the resulting effects and relate them to edge features ("high pass") or to tonal ("low pass") information. The chosen image for such tests was the digitalized photograph of a candle light, which contains all the necessary attributes for an objective evaluation of the filters.

The behavior of the filters was evaluated using a practical example of remote sensing applied to geosciences. A TM-Landsat image of the Camaquã Mines region, Rio Grande do Sul (Southern Brazil), was chosen for the study. The area had been previously processed with success by means of orbital remote sensing aided by intense field control. Very sound elements thus obtained helped evaluate the employed methodology.

Field work was not carried out for the present work, once it was not intended to repeat the Camaquã Mines mapping. Therefore, the results obtained by interpreting the images previously treated using the proposed methodology were compared with the existing maps, in special those that have been generated by TM-Landsat images.

Agradecimentos:

Agradeço a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

ao meu orientador, Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida, caro "Teco", pelo apoio e entusiasmo na elaboração deste projeto, no qual mostrou ser, além de um orientador sempre presente e dedicado, um amigo inestimável;

ao Prof. Dr. Fábio Taioli pelo auxílio e orientação no desenvolvimento dos cálculos matemáticos, bem como pelo companheirismo e dedicação com que sempre me recebeu nos momentos de dúvida;

ao Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto, pela ajuda no desenvolvimento dos algoritmos;

ao Prof. Dr. Romalino Fragoso Cesar e ao geólogo Gelson Luis Fambrini, pelo entusiasmo e pelo auxílio na discussão da geologia da área de testes;

à minha esposa, paleontóloga Fresia Ricardi Branco pela paciência, dedicação e estímulos com que acompanhou todo o desenvolvimento deste trabalho;

aos meus pais que, ensinando-me a pensar, permitiram que tudo isto fosse possível;

à FAPESP, por haver financiado esta pesquisa através do Projeto de Auxílio à Pesquisa No e ao CNPq, por haver concedido uma Bolsa a nível de Mestrado

I. Introdução e Objetivos

As filtragens por convolução constituem uma técnica comumente utilizada no processamento digital de imagens, não apenas por representarem uma prática de fácil compreensão e implementação, mas também por fornecerem resultados bastante satisfatórios no realce textural e de feições lineares. São ainda utilizados na eliminação ou minoração de ruídos comumente presentes em imagens de sensoriamento remoto.

Embora sejam descritas em todos os livros-texto que tratam do processamento digital de imagens, são poucos os trabalhos publicados nos últimos anos que tratam do tema de forma aprofundada, ou que fornecem algum aporte realmente novo sobre o assunto.

Esta técnica, baseada apenas em operações matemáticas simples, utiliza intensamente os recursos de processamento do sistema devido à enorme quantidade de cálculos necessários para processar uma imagem. A aplicação de um filtro de 101×101 células, por exemplo, implica na execução de 20.402 operações para cada *pixel* da imagem o que, considerando uma área de 1024×1024 *pixels*, corresponde a 13.852.468.352 operações aritméticas, exigindo um tempo de processamento muito grande, quando se utilizam computadores pessoais (PCs), mesmo os mais rápidos encontrados atualmente no mercado. Possivelmente seja este o motivo pelo qual são raros os trabalhos que utilizam filtragens por convolução com a aplicação de filtros de grandes dimensões, embora seja conhecido o fato de que as dimensões das feições realçadas por um filtro passa altas, por exemplo, são diretamente proporcionais às dimensões do operador¹ utilizado.

Quanto às aplicações, praticamente não foram encontradas citações do uso de filtros de convolução para realce da informação tonal de qualquer tipo de imagem, ou em especial, da informação espectral de imagens de sensoriamento remoto. Embora seja conhecido que filtros passa altas - utilizados para realce de bordas ou para o realce textural - excluem as informações tonais, não há menção sobre o caráter desta informação excluída ou de sua utilização. O “resíduo” de uma filtragem passa altas, assim, possui a informação tonal da imagem, que pode ser utilizado como método de realce daquele tipo de informação.

Esta aplicação, entretanto, não é feita, pois os filtros passa baixas são utilizados apenas para a eliminação de ruídos. Entre os filtros passa baixas, os mais utilizados são os filtros de média, constituindo-se em uma técnica menos explorada do que os passa altas.

¹ * Diversos têm sido os termos utilizados para designar as matrizes de convolução. Dentre eles, consideramos como mais apropriada a designação de “operador”, por tratar-se de uma matriz numérica que interage (opera) com os *pixels* da imagem de forma diversa das operações matriciais tal como são descritas no âmbito da matemática.

A única citação encontrada sobre realce tonal de imagens de sensoriamento remoto através de filtragem passa baixas corresponde a um exemplo dado por Mather (1995), no qual são comparadas imagens obtidas pela aplicação de filtros passa altas e passa baixas sobre uma imagem Landsat-4 MSS do Arizona. O autor comenta que, surpreendentemente (SIC) uma estrutura geológica circular, centrada na confluência entre os rios Colorado e San Juan, é mais evidente na imagem obtida pela filtragem passa baixas do que na passa altas, porém não são tecidas maiores considerações acerca das causas que teriam gerado tal diferenciação entre as duas imagens.

Observe-se ainda, que Mather (1995) desenvolve o tema "filtragens por convolução" mais extensivamente que outros livros-texto, razão pela qual é citado com maior frequência neste capítulo.

Os objetivos desta pesquisa podem ser resumidos nas seguintes proposições:

- 1) uma nova forma para a ponderação dos pesos atribuídos às células do operador, excluindo o desbalanceamento inerente aos filtros tradicionalmente utilizados;
 - 2) um programa para a geração de filtros proporcionais de dimensões compreendidas no intervalo de 3x3 a 255x255;
 - 3) a utilização de filtros de grandes dimensões para o realce de feições amplas;
 - 4) a utilização de filtros passa baixas de grandes dimensões para o realce tonal de imagens de sensoriamento remoto em geologia, bem como o programa para a sua geração
 - 5) um ensaio de método de aplicação;
 - 6) testar os métodos propostos em área de geologia conhecida (região das minas do Camaquã, RS) e previamente trabalhada com sucesso em sensoriamento remoto. Nos testes apresentados, foram utilizados os mesmos produtos de sensoriamento remoto e as mesmas técnicas de processamento digital de imagens descritos nos trabalhos efetuados na região, acrescendo-se as técnicas em questão no presente projeto, o que permite uma avaliação da aplicabilidade do método ora proposto;
-

II. Localização e Geologia da Área de Testes

A área-teste para a aplicação da metodologia proposta corresponde à região estudada por Silva Filho, 1997 (região das Minas do Camaquã), localizada na porção central do Escudo Sul-Riograndense (folhas topográficas SH.22-Y-A-V-3 e SH.22-Y-A-V-4, em escala 1:50.000), nas proximidades do município de Santana da Boa Vista, RS entre as coordenadas 30°50'33" e 31°00'00" de latitude sul e 53°27'03" e 53°10'30" de longitude oeste (figura 1).

Esta área foi escolhida principalmente por ser uma área excepcionalmente propícia à avaliação geológica por imagens TM-Landsat, quando comparada a outras áreas em clima tropical/subtropical do país, pois os solos são pouco profundos, a influência do substrato rochoso na cobertura vegetal é intensa e não existe ocupação antrópica intensiva atualmente.

II.1 Esboço da geologia regional

O esboço geral da geologia da região das Minas de Camaquã aqui apresentado não abarca a complexidade da geologia da área, uma vez que não é objetivo deste trabalho e que poderia prejudicar a análise das imagens TM-Landsat apresentadas, já que estas não podem fornecer o volume de informações obtido nos diversos estudos feitos anteriormente, como associações faciológicas, alterações na direção de fluxo de correntes, das áreas-fonte etc.

A geologia da região de Camaquã vem gerando uma grande controvérsia desde o século passado, começando pelo trabalho de Gorceix em 1875 (*apud* Fambrini, 1998) até os nossos dias (Silva Filho, 1997; Fambrini, 1998, entre outros), com diferentes interpretações de ambientes e associações sedimentares e, principalmente, da estratigrafia regional. No atual estágio do conhecimento pode-se dividir o arcabouço geológico do Escudo Gaúcho, na região das Minas do Camaquã em cinco unidades (figura 2) do topo para a base (Silva Filho, 1997):

- Andesitos Rodeio Velho, Eopaleozóico não definido, intrusivo na Formação Guaritas inferior).
- Formação Guaritas superior
- Formação Guaritas inferior,
- Formação Santa Bárbara, e
- Complexo Porongos (Neoproterozóico)

Figura 1: localização da área de testes (mod. de Silva Filho, 1997)

O Complexo Porongos, embasamento regional, compreende basicamente terrenos metamórficos de baixo a médio grau, cujas litologias (granitos miloníticos, clorita xistos, quartzo-clorita xistos, quartzo milonitos e mármore) são encontradas na porção leste da área de testes.

O Grupo Camaquã, que compreende as acima citadas formações Santa Bárbara, Guaritas inferior e Guaritas superior abrange a maior parte da imagem, distribuindo-se desde o extremo oeste até o contato com as litologias do Complexo Porongos ao leste. As ocorrências do Grupo Camaquã situam-se entre os terrenos proterozóicos do Escudo Gaúcho no Estado do Rio Grande do Sul, tendo sido sua história relacionada à instalação e reativação de zonas de cisalhamento de direção NE-SW (Fambrini, 1998).

A Formação Santa Bárbara (Silva Filho, 1997; Fragoso Cesar *et al.*, no prelo) ocorre na base do Grupo Camaquã e pode ser dividida em três estágios de evolução tectono-sedimentar. O primeiro estágio consiste em uma seqüência de turbiditos areno-pelíticos. O segundo estágio corresponde a depósitos em uma grande bacia contínua, onde são encontrados depósitos de leques deltaicos na base e, no topo, ocorrem arenitos conglomeráticos e conglomerados relacionados a um sistema fluvial de planície deltaica. Na imagem estudada, a Formação Santa Bárbara está presente na sua porção oeste, nas proximidades das minas de Camaquã. Apesar dessa formação ser de fácil delimitação na imagem, não é possível distinguir claramente os estágios citados.

A Formação Guaritas inferior corresponde a um pacote sedimentar que apresenta interdigitação de fácies aluviais e eólicas, tendo sido interpretado como pertencente a um sistema composto predominantemente por arenitos eólicos, representando ainda a continentalização definitiva da região. Nas proximidades da falha Tapera-Emiliano aumenta a contribuição aluvial, apresentando clastos bem arredondados da Fm. Santa Bárbara, aflorante no Alto das Minas do Camaquã. Esta formação preenche grande parte da área central, centro-leste e noroeste da imagem estudada.

A Formação Guaritas superior, por sua vez, caracteriza-se pela instalação de um sistema fluvial entrelaçado, com intercalações deltaicas na parte central e meridional, apresentando clastos bem arredondados, de litologia granítica, possivelmente retrabalhados da Fm. Santa Bárbara, tida como a principal área-fonte. Essa unidade pode ser encontrada na imagem estudada em partes das porções central e superior.

Figura 2: mapa geológico (mod. de Silva Filho, 1997)

Silva Filho (1997) divide a Formação Guaritas em seis associações faciológicas distintas, correspondendo as três primeiras à Formação Guaritas inferior, e as três últimas à Formação Guaritas superior, as quais não serão discutidas no momento, uma vez que tais associações são determinadas por estudos de estratigrafia de seqüências, considerando que a separação das associações é feita com base em características que não são passíveis de análise em sensoriamento remoto, tais como ambiente de sedimentação, gênese etc.

Fragoso César *et al.* (no prelo) levantam a hipótese da Formação Guaritas guardar uma relação muito mais próxima com a Bacia do Paraná do que com a Bacia do Camaquã, considerando a discordância angular superior a 15° que marca o contato entre a Formação Guaritas e o Grupo Camaquã, em contraposição à discordância erosiva suavemente angular (menor que 3°) com relação ao Grupo Tubarão, sobreposto. Desse modo, seria razoável considerar a Formação Guaritas como o primeiro evento deposicional da Bacia do Paraná na região, excluindo-a do Escudo Gaúcho.

As rochas da Formação Guaritas estão em contato com rochas metamórficas do embasamento proterozóico (Complexo Porongos), com rochas ígneas (andesitos Rodeio Velho) e com rochas sedimentares de diversas unidades do Grupo Camaquã.

Embora as diversas litologias presentes tanto na Fm. Guaritas quanto nas demais unidades sedimentares sejam semelhantes, as respostas espectrais observadas em imagens TM-Landsat (Ohara, 1982; Ribeiro de Almeida *et al.*, 1997; Silva Filho, 1997 e Fambrini, 1998) permitem uma clara discriminação das unidades principais. Outra característica que permite tal diferenciação refere-se ao caráter textural, extremamente variado nas imagens, e que guarda estreita relação com a geologia local.

III. Trabalhos Anteriores

Uma característica das imagens de sensoriamento remoto é o parâmetro denominado frequência espacial, definido por Jensen (1986) como sendo o número de mudanças no brilho por unidade de distância em uma dada porção da imagem. Segundo este autor, áreas que apresentam um pequeno número de mudanças em uma determinada direção são consideradas como áreas de baixa frequência, enquanto onde tais mudanças ocorrem em maior número são ditas de alta frequência espacial.

Uma definição diversa, porém não menos correta é dada por Lillesand & Kiefer (1994), que considera a frequência espacial relacionada com a rugosidade causada pela variação tonal que ocorre na imagem, de forma que, se em uma determinada área os tons de cinza (DN ou *Digital Number*) variam de forma abrupta, diz-se que esta apresenta uma alta frequência de variação tonal. No caso inverso, ou seja, em uma área onde tais variações ocorrem de forma gradativa, a variação é considerada como de baixa frequência.

Segundo Crósta (1993), a plotagem em um gráfico das variações tonais em uma imagem de sensoriamento remoto produz uma curva geralmente complexa, a qual pode ser decomposta em um conjunto de senóides de diferentes frequências e amplitudes (figura 3).

Figura 3: decomposição do perfil de variações tonais de uma imagem genérica em curvas senoidais (modificado de Crósta, 1993).

Este mesmo autor considera que os padrões cuja variação tonal é lenta podem ser vistos como uma senóide com grande comprimento de onda, ou baixa frequência, de forma que um filtro capaz de separar esta componente do restante da informação presente em uma imagem é

denominado *passa baixas*. Contrariamente, os detalhes, cujos tons variam mais rapidamente são representados por senóides com pequeno comprimento de onda, ou alta frequência. Os filtros que ressaltam este tipo de informação são denominados *passa altas* (figura 4).

Figura 4: comparação entre os efeitos produzidos por filtragens passa altas e passa baixas em uma seqüência de dados unidimensional (mod. de Mather, 1995).

Pode-se observar, no exemplo acima, que o realce das baixas frequências implica em uma atenuação das altas frequências. No caso do realce das altas frequências dá-se o inverso, surgindo valores superiores ao máximo presente nos dados originais, ou inferiores ao mínimo (Mather, 1995).

Estruturas lineares, sejam naturais, como juntas e falhas, ou antrópicas, como estradas, normalmente aparecem nas imagens como feições de alta frequência, pois apresentam limites bem definidos, estando representadas por variações tonais bruscas. O estudo de tais estruturas representa uma importante contribuição para os trabalhos relacionados às geociências. Segundo Moore & Waltz (1983), falhas e juntas em rochas podem servir como guias na localização de ocorrências de água subterrânea, minérios e petróleo.

Baseado neste mesmo princípio, Leite (1998) realizou um estudo voltado à localização e caracterização de feições estruturais relacionadas ao potencial em águas subterrâneas da região de Taiuá, no Estado do Ceará, para o qual utilizou-se de imagens TM-Landsat. Naquele estudo, o

autor aplicou filtros isotrópicos e direcionais para o realce das estruturas potencialmente promissoras, obtendo resultados bastante satisfatórios.

Como exemplos da importância do mapeamento estrutural por meio de imagens de sensoriamento remoto pode-se citar ainda a prospecção de fluorita em cruzamento de falhas normais e transcorrentes (Ferreira & Ribeiro de Almeida, 1989), aquíferos em zonas fraturadas ou descontinuidades geológicas (Krishnamurthy *et al.*, 1992), ouro em zonas de cisalhamento (Prado & Crósta, 1997), entre outros.

A localização, padrões e densidade de tais estruturas (no caso destas corresponderem a fraturas ou falhamentos) são também importantes para a análise de ameaças geológicas, tais como terremotos, escorregamentos, estabilidade de represas, integridade de fundações e susceptibilidade da água subterrânea à poluição e contaminação (Moore & Waltz, 1983),.

Segundo Wood *et al.* (1989) através da remoção das baixas frequências em uma imagem pode-se realçar as informações mais importantes do ponto de vista de interpretação, relacionadas às altas frequências, destacando-se o realce das informações texturais.

Entretanto, o realce das altas frequências implica necessariamente na atenuação ou eliminação da informação tonal da imagem. No caso de imagens de sensoriamento remoto, a informação tonal está intimamente relacionada à forma como cada tipo de material superficial interage com a radiação eletromagnética, refletindo assim, as características espectrais da imagem relacionadas ao tipo de material existente no terreno (vegetação, litologia etc.).

Desse modo, a aplicação de filtros passa altas pode comprometer uma análise da imagem de um outro ponto de vista que não o de texturas e estruturas, como por exemplo, para o mapeamento litológico por comportamento espectral.

Existem basicamente dois métodos complementares, baseados em técnicas de processamento digital de imagens, destinados a realçar uma faixa de frequências presente na imagem, excluindo as demais (Mather, 1995).

O primeiro destes métodos, baseado nas transformadas de Fourier, trabalha no denominado "domínio de frequências" e o segundo, filtragem por convolução, opera no domínio espacial (Drury, 1993, entre outros).

A maior parte dos trabalhos recentes relacionados a filtragem em imagens utilizam as Transformadas de Fourier, as quais, embora sejam de implementação mais complexa do que as filtragens por convolução, permitem, segundo Mather (1995), a geração de filtros para supressão,

atenuação ou amplificação de qualquer grupo de frequências espaciais. Exemplos de aplicação de tais técnicas são encontrados em Pavlidis (1980), Niño *et al.* (1993), Souza Filho & Diniss (1997) entre outros.

Os filtros de convolução, (Drury, *op. cit.*), são encontrados na grande maioria (senão na totalidade) dos sistemas de processamento de imagens, uma vez que utilizam procedimentos matemáticos mais simples e de fácil compreensão. Possivelmente por estes motivos os filtros de convolução tornaram-se mais populares em trabalhos aplicados, nos quais o processamento digital de imagens entra apenas como uma ferramenta, utilizada por usuários pouco especializados.

Mather (1995) considera que existe geralmente uma correspondência direta (um-a-um) entre filtros do domínio espacial e de frequências, de modo que filtros específicos podem ser mais fáceis de projetar no domínio de frequências (transformada de Fourier), embora possam ser aplicados de forma mais eficiente no domínio espacial (convolução).

III.1. Filtragem por convolução

Conforme comentado anteriormente, as filtragens por convolução são descritas em detalhe na maioria dos livros-texto de processamento digital de imagens voltados a usuários não especializados (Colwell, 1983; Jensen, 1986; Gupta, 1991; Crósta, 1993; Drury, 1993; Lillesand & Kiefer, 1994, entre outros) além de trabalhos específicos, figurando ainda como uma técnica importante em trabalhos aplicados.

O conceito geral destes filtros foi desenvolvido inicialmente para aplicação em dados geofísicos, com a finalidade de separar os sinais a serem analisados dos ruídos inerentes ao processo de medição, a partir do início da revolução digital, com a formação de um grupo de pesquisa no MIT (Massachusetts Institute of Technology), na década de 1960 (Webster, 1978). Posteriormente, com a popularização das imagens digitais, esta mesma técnica passou a ser utilizada em seu processamento. São, entretanto, pouco frequentes os trabalhos que abordam especificamente a técnica, como por exemplo, Paradella & Dutra (1980), Peli & Lim (1982), Moore & Waltz (1983), Dutra & Mascarenhas (1984), Wood *et al.* (1989), He & Wang (1991), Krishnamurthy *et al.* (1992), Drewniok (1994) e Strickland & Aly (1985).

III.2. Filtros passa baixas

Para melhor compreensão do processo de filtragem por convolução, Mather (1995) considera inicialmente uma série de dados com distribuição unidimensional (figura 5).

Figura 5: exemplo de uma série unidimensional de dados, mostrando o efeito da aplicação de um filtro passa baixas de média móvel de 3 células (mod. de Mather, 1995).

Neste exemplo, baseado em Mather (1995), para obter o realce das baixas frequências na série de dados filtrada foi efetuada a média de três pontos consecutivos da relação original de dados. Esse tipo de filtro é denominado de "média móvel" uma vez que para a obtenção de cada novo valor é calculada a média entre o valor original correspondente e seus vizinhos. Assim, atribuindo-se à distância o índice j e denominando os valores de DN para cada ponto j de x_j , tem-se, para a aplicação de um filtro unidimensional de cinco células, por exemplo, os valores y_j calculados segundo a expressão:

$$y_j = (x_{j-2} + x_{j-1} + x_j + x_{j+1} + x_{j+2})/5 \quad (1)$$

A fórmula acima exemplifica o que ocorre na aplicação de um filtro de média móvel de 5 células. No caso da figura 4, que exemplifica a aplicação de um filtro de média móvel de 3 células, para o cálculo de cada y_j é feita a média entre apenas três valores de x (x_{j-1} , x_j e x_{j+1}), o mesmo ocorrendo para qualquer número de células que forem considerados. Deve-se notar, entretanto, que o número de células do filtro deve ser necessariamente ímpar, e que serão perdidos os n valores iniciais e os n valores finais dos dados originais, sendo o valor n igual à metade do número de células do filtro menos 0,5 (Mather, 1995). A perda dos valores iniciais e finais da sequência de dados é denominada "efeito de bordas" (Crósta, 1993).

O mesmo filtro descrito pela expressão 1, poderia ser apresentado sob a forma do vetor (operador) presente na figura 6, a seguir.

1/5 X	1	1	1	1	1
-------	---	---	---	---	---

ou

1/5	1/5	1/5	1/5	1/5
-----	-----	-----	-----	-----

Figura 6: exemplo de operador unidimensional passa baixas, de média móvel

No caso de uma imagem, onde os dados distribuem-se de forma bidimensional, os operadores devem obedecer ao mesmo princípio, de modo que um operador destinado a realizar uma filtragem de média móvel equivalente à exemplificada acima seria uma matriz de 5x5 células, onde todos os valores seriam iguais a 1/25 (Mather, 1995).

Neste caso, tem-se um filtro passa baixas, uma vez que as variações de alta frequência são excluídas devido ao cálculo da média móvel (Mather, 1995). As referências encontradas na literatura a respeito destes filtros são geralmente relacionadas à eliminação de ruídos, feições de alta frequência eventualmente presentes em imagens de sensoriamento remoto.

Souza Filho & Diniss (1997) comparam diversas técnicas destinadas à eliminação de ruídos, entre as quais encontram-se as filtrações por convolução com filtros passa baixas. Neste caso, segundo os autores, os testes feitos em imagens contendo ruídos periódicos e randômicos mostram que esse tipo de filtro permite suprimir parte do ruído randômico causando, por outro lado, a perda da informação de alta frequência, relacionada às feições topográficas, por exemplo.

Matematicamente (segundo Drury, 1993) pode-se representar uma imagem pela função $P(i,j)$, onde i e j são respectivamente as coordenadas de linha e coluna de um dado *pixel*. O operador, neste caso, seria uma matriz de dimensões $2M+1$ linhas por $2N+1$ colunas, na qual cada célula tem um valor C . O operador pode ser expresso, portanto, por uma função $C(k,l)$, onde k e l são as coordenadas de linha e coluna na matriz. A imagem resultante $O(i,j)$ pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$O(i,j) = \sum_{k=-M}^M \sum_{l=-N}^N P(i+k, j+l) * C(k+M+1, l+N+1) \quad (2)$$

Na aplicação de filtrações de convolução em imagens bidimensionais ocorre o mesmo efeito de bordas descrito para a filtragem unidimensional, ou seja, as bordas da imagem perdem

as primeiras M linhas e N colunas, pois além destes limites não existem *pixels* vizinhos suficientes na imagem original para que se possa efetuar o cálculo (Crósta, 1993).

Os operadores mais comumente utilizados para produzir filtragens passa baixas apresentam todos os valores das células positivos. Na aplicação do filtro, o DN de cada *pixel* da imagem original é substituído pela soma dos produtos dos DN dos *pixels* vizinhos pelas células correspondentes no operador. Considerando que em sensoriamento remoto normalmente trabalha-se com imagens de 8 bits (máximo de 256 tons de cinza), e que a imagem gerada terá, normalmente, uma grande quantidade de DN's maiores que 255, é necessário reescalonar os DN's gerados para o intervalo de 0 a 255. Esse reescalonamento pode ser feito pela simples divisão do valor de DN gerado pela soma dos valores de todas as células do operador (Drury, 1993, entre outros).

Desse modo, pode-se considerar que cada DN na imagem gerada corresponde a uma média entre o DN original e seus vizinhos, ponderada pelos valores do operador. Assim, ao efetuar a filtragem, os valores discrepantes, por vezes relacionados a ruídos, desaparecem ou têm seu efeito minimizado. Da mesma forma as feições de alta frequência presentes são suavizadas, pois ao invés de uma mudança brusca dos DN's obtém-se uma passagem gradativa de uma área clara a outra mais escura. Exemplos de operadores passa baixas são apresentados na figura 7.

1/9 x	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
Ou			
1/9	1/9	1/9	
1/9	1/9	1/9	
1/9	1/9	1/9	
1/16 x	1	2	1
	2	4	2
	1	2	1
1/16	1/8	1/16	
1/8	1/4	1/8	
1/16	1/8	1/16	

Figura 7: exemplos de operadores passa baixas (Marion, 1991, entre outros)

A aplicação de tais filtros, a exemplo do que ocorre com os filtros de média móvel, gera, além da diminuição dos ruídos de alta frequência, um efeito, por vezes indesejável, semelhante à perda do foco de um sistema óptico, gerando uma imagem de menor nitidez do que a original devido à retirada das altas frequências da imagem original (Schowengerdt, 1983). Este efeito,

segundo o mesmo autor, será tanto mais acentuado quanto maiores forem as dimensões do operador utilizado, e pode ser minimizado através do incremento no valor da célula central do operador, que equivale à adição, parcial ou total, da imagem original.

Souza Filho & Diniss (1997), referindo-se aos filtros de convolução passa baixas para remoção de ruídos de alta frequência, ressaltam que uma vez dominada a técnica básica de filtragem por convolução, o problema passa a ser o enorme número de operadores disponíveis. Neste sentido, os autores afirmam que a questão a ser respondida é "Como escolher apropriadamente os pesos a serem atribuídos às células do operador a fim de se obter a remoção de ruído desejada?"

III.3. Filtros passa altas

Segundo Mather (1995), o processo de imageamento do terreno envolve um certo espalhamento da radiação, no qual as altas frequências são suprimidas em relação às componentes de baixa frequência da imagem. Segundo o autor, é intuitivo que a qualidade visual de uma imagem pode ser melhorada aumentando-se seletivamente a contribuição de suas componentes de alta frequência.

A imagem resultante da aplicação de um filtro do tipo passa altas apresenta um realce de bordas em relação à imagem original, devido à remoção das feições de baixa frequência. Este realce de bordas torna mais evidentes as variações tonais de alta frequência presentes na imagem original, que correspondem, muitas vezes, a estruturas do terreno (Gupta, 1991).

Para o estudo dos filtros passa altas, será tomado por base um gráfico semelhante ao apresentado anteriormente, para os filtros de média móvel (figura 8). Neste caso, será aplicado, como operador passa altas, o vetor:

-1	2	-1
----	---	----

Nota-se, neste exemplo, que ao contrário do que ocorre com os filtros passa baixas (figura 5), não se pode reconhecer a baixa frequência presente na série de dados original, mas apenas as altas frequências, com grande realce. Quanto ao efeito de bordas, este é idêntico àquele presente no caso dos filtros passa baixas.

Figura 8: exemplo de uma série de dados unidimensional, mostrando o efeito da aplicação de um filtro passa altas de 3 células (baseado em Mather, 1995)

Assim, a obtenção de um filtro de convolução que realce as altas freqüências em detrimento das baixas freqüências pode ser feita de duas formas distintas, basicamente.

III.3.1. Método da subtração da imagem

Conforme comentado anteriormente, os filtros passa altas destinam-se a retirar da imagem as informações referentes às baixas freqüências, tornando mais evidentes aquelas relacionadas às altas freqüências. Assim, segundo Schowengerdt (1983), Jensen (1986) e Mather (1995), subtraindo o resultado de uma filtragem passa baixas da imagem original, tem-se como resultado uma imagem apenas com as altas freqüências, equivalendo a uma filtragem passa altas.

Em uma série de dados unidimensional, o cálculo, baseado na equação 1, seria o seguinte (equação 3):

$$\begin{aligned}
 z_j &= x_j - y_j = x_j - (x_{j-2} + x_{j-1} + x_j + x_{j+1} + x_{j+2})/5 \\
 z_j &= x_j - (x_{j-2} + x_{j-1} + x_j + x_{j+1} + x_{j+2})/5 \\
 z_j &= (5x_j - x_{j-2} - x_{j-1} - x_j - x_{j+1} - x_{j+2})/5 \\
 z_j &= (4x_j - x_{j-2} - x_{j-1} - x_{j+1} - x_{j+2})/5 \quad (3)
 \end{aligned}$$

Onde: x_j = valor do *pixel* x no ponto j

y_j = valor do *pixel* filtrado por filtro de média móvel y no ponto j

z_j = valor do *pixel* filtrado por filtro passa altas z no ponto j

O cálculo do operador (vetor, se unidimensional ou matriz, bidimensional) pode ser efetuado considerando-se um *pixel* de valor unitário em uma imagem e subtraindo dele um filtro passa baixas (de média móvel, por exemplo).

Desse modo, o operador unidimensional gerado poderia ser expresso sob a forma do vetor apresentado na figura 9.

$$\frac{1}{5} \times \begin{bmatrix} -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Ou

$$\begin{bmatrix} -1/5 & -1/5 & 4/5 & -1/5 & -1/5 \end{bmatrix}$$

Figura 9: exemplo de operador unidimensional passa altas

Efetuando-se agora o mesmo cálculo para um operador bidimensional pode-se obter a seguinte expressão (figura 10):

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/9 & -1/9 & -1/9 \\ -1/9 & 8/9 & -1/9 \\ -1/9 & -1/9 & -1/9 \end{bmatrix}$$

Ou, o operador passa altas bidimensional pode ser escrito como sendo:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 10: obtenção de um operador passa altas a partir de um operador passa baixas de média móvel.

III.3.2. Métodos derivativos

Outro método para a obtenção de filtragens passa altas é baseado no conceito matemático de derivadas.

Segundo Mather (1995) a derivada de uma função contínua pode ser definida como sendo a taxa de variação da função em um determinado ponto.

Por exemplo, a primeira derivada da posição de um objeto em movimento escalar linear em função do tempo é a velocidade, ou seja, a velocidade representa a taxa de variação da posição do objeto, num determinado momento, ao longo da sua trajetória.

Da mesma forma, a primeira derivada da velocidade de um objeto em movimento escalar linear acelerado em função do tempo corresponde à sua aceleração. Assim, pode-se considerar que a aceleração do objeto em movimento escalar linear acelerado é a segunda derivada da posição do objeto em função do tempo (derivada da velocidade ou derivada da derivada da posição do objeto).

Aquele autor faz uma analogia entre o que ocorre com a velocidade e aceleração de um objeto no espaço ao longo do tempo e o que ocorre com a variação tonal em uma imagem. Segundo o autor, pode-se considerar que a taxa de variação dos tons de cinza (Δp) em uma imagem corresponde à velocidade, no exemplo anterior. Em uma imagem, entretanto, a variação tonal pode ser tomada com respeito a dois eixos (x e y). Assim, a derivada da variação tonal em uma imagem corresponde à soma vetorial das duas derivadas parciais (Δx e Δy - figura 11), de modo que o valor da derivada geral (Δxy) da variação tonal em função da posição em uma imagem corresponde à raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas parciais.

Figura 11: exemplo de soma vetorial para cálculo da primeira derivada dos DNs em função da posição em uma imagem (baseado em Mather, 1995).

O mesmo autor considera ainda que essas três derivadas (em função de x , de y e geral, também denominada de primeira derivada ou gradiente no ponto considerado) podem ser calculadas para qualquer ponto da imagem indicando, para esse ponto, a taxa de variação tonal na direção x , a taxa de variação tonal na direção y , a máxima taxa de variação tonal em qualquer direção e a direção dessa taxa máxima. Assim, em uma área absolutamente homogênea, os três valores serão iguais a zero; se a área for praticamente homogênea, os três valores serão pequenos

e, em uma área onde haja uma variação rápida nos tons de cinza (uma feição linear), o gradiente terá um valor elevado. Essa feição, cujo gradiente é alto pode ser considerada como uma feição de alta frequência, segundo a definição apresentada por Lillesand & Kiefer (1994). Assim, a primeira derivada (ou gradiente) de uma imagem identifica as porções de alta frequência da imagem (Mather, 1995).

Drury (1993) considera que de forma análoga ao que ocorre com o gradiente de uma imagem, mudanças neste gradiente relacionam-se também às bordas e limites presentes, podendo ser calculadas através da segunda derivada, a qual indicará, segundo Mather (1995) as áreas onde o gradiente é constante (segunda derivada igual a zero) ou variável, permitindo localizar os limites das feições de alta frequência presentes.

Calcula-se agora a segunda derivada ($\Delta x_2 p_{(i,j)}$, $\Delta y_2 p_{(i,j)}$ e $\Delta xy_2 p_{(i,j)}$), com base nas equações (4), (5) e (6) (segundo Mather, 1995):

$$\Delta x_2 p_{(i,j)} = [\Delta x p_{(i+1,j)}] - [\Delta x p_{(i,j)}]$$

$$\Delta x_2 p_{(i,j)} = [p_{(i+1,j)} - p_{(i,j)}] - [p_{(i,j)} - p_{(i-1,j)}]$$

$$\Delta x_2 p_{(i,j)} = p_{(i+1,j)} + p_{(i-1,j)} - 2 p_{(i,j)} \quad (7)$$

analogamente,

$$\Delta y_2 p_{(i,j)} = p_{(i,j+1)} + p_{(i,j-1)} - 2 p_{(i,j)} \quad (8)$$

e, segundo o mesmo autor, a função de segunda derivada (denominada de "operador de Laplace"), seria definida por:

$$\Delta xy^2 p_{(i,j)} = \Delta x^2 p_{(i,j)} + \Delta y^2 p_{(i,j)}$$

$$\Delta xy^2 p_{(i,j)} = [p_{(i+1,j)} + p_{(i-1,j)} - 2p_{(i,j)}] + [p_{(i,j+1)} + p_{(i,j-1)} - 2p_{(i,j)}]$$

$$\Delta xy^2 p_{(i,j)} = [p_{(i+1,j)} + p_{(i-1,j)} + p_{(i,j+1)} + p_{(i,j-1)}] - 4p_{(i,j)} \quad (9)$$

Mather (1995) ressalta que o operador de Laplace deve ser subtraído da imagem original a fim de gerar o realce das feições de alta frequência, eliminando o espalhamento decorrente do processo de imageamento.

Desse modo, o operador Laplaciano pode ser aplicado através da utilização da matriz apresentada na figura 12.

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Operador Laplaciano

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

Imagem menos operador Laplaciano

Figura 12: operador Laplaciano calculado segundo Mather (1995), e o operador passa altas "imagem menos Laplaciano".

Diversos operadores já foram propostos a fim de gerar filtragens passa altas (Gurney, 1980; Lee, 1980; Peli & Lim, 1982; Colwell, 1983; Moore & Waltz, 1983; Strickland & Aly, 1985; Jensen, 1986; Wood *et al.*, 1989; Gupta, 1991; Crósta, 1993; Drury, 1993; Drewniok, 1994; Lillesand & Kiefer, 1994).

Como no caso dos filtros passa baixas, a técnica baseia-se no cálculo de uma média ponderada. Porém, nos operadores passa altas, às células vizinhas do centro são atribuídos valores negativos e à célula central é atribuído um valor positivo maior ou igual à soma (em módulo) dos demais, conforme apresentado na figura 13.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

a

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

b

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

c

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

d

Figura 13: exemplos de operadores passa altas (Strickland & Aly, 1985 e Drury, 1993)

Segundo Young & Fu (1986), com a aplicação de um filtro Laplaciano, os *pixels* da imagem são levados aos extremos claro ou escuro (0 ou 255, no caso de imagens de 8 bits). Este efeito pode ser controlado através da variação do valor da célula central do operador. Caso o valor da célula central seja igual à soma dos demais (figura 13a e 13b), toda a informação tonal da imagem será perdida, enquanto que incrementando esse valor, uma porcentagem da informação tonal original estará sendo adicionada à imagem resultante (figuras 13c e 13d).

Assim, considerando-se que:

O = imagem original;

BF = imagem de baixas frequências (ou imagem sobre a qual foi aplicado um filtro passa baixas);

AF = imagem de altas frequências

c = constante ≥ 1

Pode-se escrever a seguinte expressão:

$$c * O - BF = AF \quad (10)$$

Variando o valor de c pode-se controlar a quantidade da informação tonal original que estará sendo preservada na imagem de altas frequências.

As dimensões do operador podem variar em função da área em que será aplicada a filtragem ou das dimensões das feições que se pretende realçar. A maioria dos autores utilizam operadores de 3 por 3 células, 5 por 5, 7 por 7 ou 9 por 9 (Gurney, 1980; Lee, 1980; Shanmugan & Paul, 1982; Moore & Waltz, 1983; Strickland & Aly, 1985; Jensen, 1986; Young & Fu, 1986; Westin, 1990 e Drewniok, 1994). São pouco frequentes na literatura trabalhos que apresentem operadores de dimensões maiores, como em Peli & Lim, 1982 (17 por 17), Colwell, 1983 e Schowengerdt, 1983 (de 31 por 31 a 101 por 101) e Wood *et al.*, 1989 (de 101 por 101 a 301 por 301).

Segundo Schowengerdt (1983), com o aumento das dimensões do operador em um filtro passa altas, um número menor de componentes de baixa frequência é excluído da imagem original, sendo mantida na imagem filtrada uma parcela maior de frequências. Neste sentido, o autor afirma que operadores passa altas muito grandes (como 101x101, por exemplo) podem ser utilizados para remover as frequências mais baixas de uma imagem.

Nos exemplos anteriores os operadores apresentam uma distribuição de pesos simétrica em todas as direções, o que gera um realce isotrópico das altas frequências na imagem. Os filtros desta natureza são denominados filtros isotrópicos. Pode-se notar ainda, que os pesos atribuídos às células do operador podem ser constantes ou não. Neste último caso, é simples de se imaginar que os *pixels* mais próximos do centro do operador têm uma importância maior, devido à maior probabilidade de conter uma informação correlacionável com aquela presente no *pixel* que terá

seu DN alterado. Assim, as células mais próximas do centro do operador devem apresentar pesos maiores (em valores absolutos) do que aquelas que se situam a grandes distâncias, principalmente no caso de estarem sendo utilizados operadores de grandes dimensões.

Entretanto, nos operadores Laplacianos, a distribuição dos pesos no operador não é exatamente proporcional, o que não representa muito em se tratando de operadores de 3x3 células.

Na literatura são citados, habitualmente, operadores com dimensões maiores que 3x3 tendo o valor -1 em todas as células, com exceção da central, o que implica em um desbalanceamento que aumenta proporcionalmente às dimensões do operador.

IV. Materiais e Métodos

As pesquisas que compõem este trabalho foram desenvolvidas em microcomputadores do tipo PC-Pentium particulares ou pertencentes ao LIG – Laboratório de Informática Geológica do Instituto de Geociências da USP. O programa utilizado para processar as imagens foi o ER- Mapper, em ambiente Windows 95 ou Windows NT e os programas desenvolvidos para a geração dos filtros foram escritos em linguagem Pascal (anexos 1 e 2). A listagem desses programas em Pascal podem ser encontradas em anexo, no final do volume.

A seguir, será descrita a metodologia empregada para a geração dos filtros de convolução utilizados neste trabalho (aqui denominados de "filtros de convolução proporcionais"), bem como os testes preliminares efetuados para sua avaliação.

Conforme mencionado anteriormente, Souza Filho & Diniss (1997) comentam que um dos principais problemas relacionados à escolha do operador a ser utilizado para uma determinada finalidade diz respeito à "escolha" dos pesos a serem atribuídos a cada célula do operador.

Na grande maioria dos filtros passa altas de 3x3 células utilizados na bibliografia existe uma forte tendência a se atribuírem valores maiores (em módulo) às células vizinhas ao centro do operador do que àquelas que encontram-se a distâncias maiores (exemplos: figuras 11 e 13), conforme comentado anteriormente. Nesse sentido, procurou-se produzir filtragens nas quais o peso atribuído a cada célula do operador fosse inversamente proporcional à distância desta célula em relação ao centro do mesmo.

IV.1 Método para a geração dos filtros isotrópicos passa altas

A técnica proposta para a elaboração de filtros isotrópicos baseia-se, portanto, no cálculo da distância efetiva de cada célula do operador à célula central.

Inicialmente, considera-se o seguinte operador (figura 14):

A_2	A_1	A_2
A_1	X	A_1
A_2	A_1	A_2

Figura 14: modelo para cálculo do operador proporcional

Adotando-se a distância de X a A_1 ($X-A_1$) como sendo 1, e calculando a distância ($X-A_2$), tem-se a expressão:

$$(X - A_2) = \sqrt{2(X - A_1)^2} = \sqrt{2} \quad (11)$$

Como o valor das células deve ser proporcional ao inverso da distância ao centro, resulta o operador que se segue (figura 15):

$-1/\sqrt{2}$	-1	$-1/\sqrt{2}$
-1	6,828	-1
$-1/\sqrt{2}$	-1	$-1/\sqrt{2}$

-0,7071	-1	-0,7071
-1	6,828	-1
-0,7071	-1	-0,7071

Figura 15: operador calculado de forma proporcional às distâncias do centro

No caso de um operador de 3X3, a diferença é representada apenas pelo fato do valor das células mais distantes do centro não ser nulo. Entretanto, aplicando a mesma técnica a um filtro de 5X5 ou maior, nota-se que o operador proposto apresenta uma geometria própria, distinta daquela encontrada em qualquer outro operador descrito na literatura, conforme mostrado na figura 16, para um setor de um operador de 13x13 células.

A_{18}	A_{19}	A_{20}	A_{22}	A_{24}	A_{25}	A_{26}
A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{17}	A_{21}	A_{23}	A_{25}
A_9	A_{10}	A_{12}	A_{13}	A_{16}	A_{21}	A_{24}
A_6	A_7	A_8	A_{11}	A_{13}	A_{17}	A_{22}
A_3	A_4	A_5	A_8	A_{12}	A_{15}	A_{20}
A_1	A_2	A_4	A_7	A_{10}	A_{14}	A_{19}
X	A_1	A_3	A_6	A_9	A_{13}	A_{18}

Figura 16: sentido de crescimento dos valores (em módulo) em um operador proporcional de 13x13 células. A linha tracejada une dois elementos de mesmo valor (A_{13}) e mesma distância em relação ao centro (X) do operador.

Considerando que o valor de cada célula deve ser inversamente proporcional à sua distância ao centro, podem-se calcular os valores de cada célula no filtro proposto (13x13), obtendo o operador apresentado na Figura 17.

-0,118	-0,128	-0,139	-0,149	-0,158	-0,164	-0,167	-0,164	-0,158	-0,149	-0,139	-0,128	-0,118
-0,128	-0,141	-0,156	-0,171	-0,186	-0,196	-0,200	-0,196	-0,186	-0,171	-0,156	-0,141	-0,128
-0,139	-0,156	-0,177	-0,200	-0,224	-0,243	-0,250	-0,243	-0,224	-0,200	-0,177	-0,156	-0,139
-0,149	-0,171	-0,200	-0,236	-0,277	-0,316	-0,333	-0,316	-0,277	-0,236	-0,200	-0,171	-0,149
-0,158	-0,186	-0,224	-0,277	-0,354	-0,447	-0,500	-0,447	-0,354	-0,277	-0,224	-0,186	-0,158
-0,164	-0,196	-0,243	-0,316	-0,447	-0,707	-1,000	-0,707	-0,447	-0,316	-0,243	-0,196	-0,164
-0,167	-0,200	-0,250	-0,333	-0,500	-1,000	≥41,96	-1,000	-0,500	-0,333	-0,250	-0,200	-0,167
-0,164	-0,196	-0,243	-0,316	-0,447	-0,707	-1,000	-0,707	-0,447	-0,316	-0,243	-0,196	-0,164
-0,158	-0,186	-0,224	-0,277	-0,354	-0,447	-0,500	-0,447	-0,354	-0,277	-0,224	-0,186	-0,158
-0,149	-0,171	-0,200	-0,236	-0,277	-0,316	-0,333	-0,316	-0,277	-0,236	-0,200	-0,171	-0,149
-0,139	-0,156	-0,177	-0,200	-0,224	-0,243	-0,250	-0,243	-0,224	-0,200	-0,177	-0,156	-0,139
-0,128	-0,141	-0,156	-0,171	-0,186	-0,196	-0,200	-0,196	-0,186	-0,171	-0,156	-0,141	-0,128
-0,118	-0,128	-0,139	-0,149	-0,158	-0,164	-0,167	-0,164	-0,158	-0,149	-0,139	-0,128	-0,118

Figura 17: valores calculados para um operador de 13 por 13 células, de acordo com o modelo descrito anteriormente.

O cálculo para se obter operadores proporcionais, portanto pode ser efetuado conforme mostrado a seguir.

Considerando um operador de $2M+1$ linhas por $2N+1$ colunas, e calculando o valor a ser atribuído a cada célula ($C_{k,l}$), verifica-se que:

$$D_{k,l} = \sqrt{k^2 + l^2} \quad (12)$$

onde $D_{k,l}$ = distância da célula $C_{k,l}$ ao centro do operador.

k = indicador da coluna ($-M \leq k \leq +M$)

l = indicador da linha ($-N \leq l \leq +N$)

Aplicando o conceito de que o valor de cada célula (exceto para a célula central) deve ser negativo e inversamente proporcional à sua distância em relação ao centro do operador, verifica-se que:

$$C_{k,l} = \frac{-1}{D_{k,l}} = \frac{-1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \quad (13)$$

Esta última equação (13) é válida para o cálculo de todas as células exceto a célula central, cujo valor será a soma dos valores absolutos das demais células, calculado segundo a expressão:

$$C'_{k,l} = \sum_{k=-M}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \quad (14)$$

Substituindo as equações (13) e (14) na equação da convolução (2) conforme expressada por Drury (1993), obtém-se a seguinte equação:

$$O_{i,j} = \left[\sum_{k=1}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} - \frac{P_{(i+k,j+l)}}{\sqrt{k^2 + l^2}} \right] + \left[\sum_{k=-M}^{k=-1} \sum_{l=-N}^{l=N} - \frac{P_{(i+k,j+l)}}{\sqrt{k^2 + l^2}} \right] + \left[\frac{P_{i,j}}{\sum_{k=-M}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} \sqrt{k^2 + l^2}} \right] \quad (15)$$

Note-se a necessidade de expressar a equação da convolução sob a forma de uma soma de três funções a fim de calcular separadamente o produto da célula central do operador pelo *pixel* de interesse e a soma dos produtos das demais células do operador pelos *pixels* vizinhos ao *pixel* de interesse.

Neste trabalho foi desenvolvido, em linguagem Pascal, um pequeno algoritmo que pode ser utilizado para a geração de operadores passa altas proporcionais. Por uma questão de praticidade, o algoritmo desenvolvido gera um filtro compatível com o programa ER-Mapper, o qual foi utilizado para o desenvolvimentos desta pesquisa.

Para a aplicação dos filtros descritos, optou-se por adotar o valor da célula central como sendo a soma das demais células do operador sem adicionar a informação original, afim de permitir uma avaliação o mais precisa possível dos resultados obtidos. Após a aplicação, os valores das células geradas assumem valores muito além dos aceitos em uma imagem de 8 bits (superiores a 255 ou inferiores a 0). Esses valores são, então, reescalados para o espaço de 256 níveis de cinza através de técnicas de manipulação de histogramas.

IV.2 Método para a geração dos filtros isotrópicos passa baixas

Sabe-se que se uma determinada imagem é tratada com um filtro passa altas, a informação referente às baixas frequências é excluída. Desse modo, subtraindo essa imagem filtrada (já com os valores dos *pixels* redistribuídos nos 256 níveis de cinza) da imagem original que a gerou (também reescalada para 256 níveis de cinza), obtém-se como resultado apenas as baixas frequências presentes originalmente.

Assim, pode-se obter um filtro passa baixas a partir de um passa altas através da subtração, conforme exposto no item III.3.1 porém, neste caso, deve-se inicialmente dividir o operador passa altas pelo valor do seu ponto central. Assim, a subtração fornecerá como resultado um operador passa baixas de média ponderada em função da distância à célula central (figura 18).

-0,707	-1	-0,707
-1	6,828	-1
-0,707	-1	-0,707

 $\cdot 1/6,828 =$

-0,1035	-0,1464	-0,1035
-0,1464	1	-0,1464
-0,1035	-0,1464	-0,1035

Para a subtração, temos:

0	0	0
0	1	0
0	0	0

 $-$

-0,1035	-0,1464	-0,1035
-0,1464	1	-0,1464
-0,1035	-0,1464	-0,1035

 $=$

0,1035	0,1464	0,1035
0,146	0	0,1464
0,1035	0,1464	0,1035

Imagem
-
Passa altas
=
Passa baixas

Figura 18: cálculo de um operador proporcional passa baixas a partir de um operador proporcional passa altas. Para efeito de cálculo, é considerado apenas 1 *pixel* da imagem, com valor unitário.

Souza Filho & Diniss (1997) ressaltam que o uso de fatores de escalamento (multiplicador dos valores das células) nos operadores deve ser evitado, posto que modificam a integridade estatística dos dados, assim, para eliminar o fator de escalamento basta multiplicar novamente o operador gerado pelo valor utilizado na divisão do operador passa altas (no caso da

figura 18, esse valor era de 6,828). Assim, obtém-se o operador passa baixas proporcional exposto a seguir (figura 19).

0,1035	0,1464	0,1035
0,146	0	0,1464
0,1035	0,1464	0,1035

 $\quad * 6,828 =$

0,707	1	0,707
1	0	1
0,707	1	0,707

Figura 19: obtenção do operador passa baixas proporcional sem o fator de escalamento

Note-se que o operador passa baixas apresenta o valor do ponto central nulo, o que não representa problema, posto que o objetivo desse tipo de operador é exatamente remover as altas frequências, ou seja, remover as informações pontuais da imagem, ressaltando aquelas de expressão mais ampla. Em outras palavras, o *pixel* original será substituído, ponderadamente, pelos valores das suas vizinhanças, “regionalizando” a informação. Quanto aos valores das demais células, estes atendem ao mesmo critério exposto para os operadores passa altas, qual seja, aumentam na razão inversa da distância da célula ao centro do operador, porém neste caso todas as células têm valores positivos.

Assim, pode-se calcular diretamente o valor de qualquer célula de um operador de $2M+1$ linhas por $2N+1$ colunas (exceto da célula central, cujo valor será nulo) através da equação:

$$C_{k,l} = \frac{1}{D_{k,l}} = \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \quad (16)$$

onde: $C_{k,l}$ = peso atribuído à célula do operador na coluna k , linha l

k = indicador da coluna ($-M \leq k \leq +M$)

l = indicador da linha ($-N \leq l \leq +N$)

A equação de convolução que permite realizar a filtragem passa baixas proporcional seria, portanto:

$$O_{i,j} = \left[\sum_{k=1}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} \frac{P_{(i+k,j+l)}}{\sqrt{k^2 + l^2}} \right] + \left[\sum_{k=-M}^{k=-1} \sum_{l=-N}^{l=N} \frac{P_{(i+k,j+l)}}{\sqrt{k^2 + l^2}} \right] \quad (17)$$

Um problema enfrentado na remoção das altas frequências de uma imagem (ou na obtenção de imagens de baixas frequências), conforme exposto anteriormente, é que a imagem resultante não apresenta informações texturais (albedo), resultando em uma imagem de difícil interpretação, uma vez que é muito difícil localizar-se na ausência de informações tais como estradas, rios, estruturas e texturas. Além disto, o olho humano é apto a discriminar feições de borda e em sua ausência a interpretação é custosa, ou mesmo, impraticável.

De modo a solucionar este problema é necessário adicionar novamente a informação referente ao albedo presente na imagem original em uma proporção que permita visualizar as informações de alta frequência necessárias, mas ainda mantendo um forte realce da informação de baixas frequências de interesse.

Neste trabalho, foram estudadas três alternativas que permitem estabelecer a relação ideal entre altas e baixas frequências:

- 1) a cada banda da composição colorida foi adicionada uma fração da imagem original;
- 2) cada banda da composição colorida foi multiplicada por uma imagem notadamente rica em albedo (no caso, foi utilizada a primeira componente principal de uma análise de principais componentes feita com base nas cinco bandas TM-Landsat do espectro refletido disponíveis).
- 3) além de adicionar uma fração da imagem original, foram montadas composições com a primeira componente principal no canal de intensidade, sem filtragem;

IV.3. Ensaios realizados

Foram seguidas três abordagens para analisar o funcionamento dos filtros propostos.

Na primeira, verificou-se a premissa básica da pesquisa, qual seja, a exclusão da informação tonal por uma filtragem passa altas e seu inverso, ou seja, a exclusão na mesma medida da informação de bordas por uma filtragem passa baixas. Caso a premissa fosse correta, seria possível obter uma imagem integralmente correlacionável com a imagem original através da soma de imagens filtradas com operadores passa altas e passa baixas de iguais dimensões. Este teste foi feito, em imagem TM-Landsat com a aplicação de operadores de 31x31 células e de 127x127 células, em um segmento de 350x350 *pixels* da banda TM4, para fornecer segurança em uma aplicação de sensoriamento remoto.

A segunda foi uma abordagem quantitativa, na qual foram verificadas as correlações numéricas e gráficas (matriz de correlação e diagramas de dispersão) existentes entre imagem original e filtradas com operadores de diversas dimensões, bem como obtidos perfis de DN's neste conjunto de imagens, para se verificar o efeito do processamento a nível de *pixel*.

Ainda nesta abordagem quantitativa, foram testados mais profundamente os filtros passa altas, pois estes serviram de base para o cálculo dos passa baixas, conforme exposto anteriormente.

Como teste para este tipo de filtro foi escolhida a banda TM4. Nesta banda foram aplicados 28 filtros de dimensões variando desde 3x3 até 255x255. Posteriormente foi calculado o grau de correlação que cada imagem gerada apresentava quando comparada à imagem TM4 original e traçada uma curva do grau de correlação que as várias imagens produzidas apresentaram com relação à imagem original.

Num terceiro enfoque, visando analisar visualmente o funcionamento dos filtros passa baixas no realce tonal (e, secundariamente, dos filtros passa altas para o realce de bordas) foram feitos testes com operadores de diversas dimensões em duas imagens distintas. Uma primeira, simples e didática, prestou-se a uma primeira análise dos métodos propostos, enquanto a outra representa sua aplicação em uma imagem orbital da área de testes, consistindo em um exemplo de aplicação prática do método proposto.

IV.3.1 Testes em imagem didática

Neste último enfoque, para fornecer informações precisas do funcionamento dos filtros, estes foram aplicados à imagem de uma chama de vela, com filtros de diversas dimensões. Tal imagem é bastante didática, considerando-se ser de conhecimento geral a subdivisão interna da chama em regiões com temperaturas e, conseqüentemente, colorações diferentes. Considerando-se a hipótese de que os filtros passa baixas ressaltam a informação tonal, tais variações devem ser mais nitidamente notadas nas imagens filtradas do que na original. Variando-se as dimensões do filtro, pode-se analisar ainda a relação entre o tamanho do operador e das feições passíveis de serem realçadas.

Para estes testes foi utilizada a chama de uma vela, a qual foi inicialmente fotografada com filme Fujicolor de ASA 100, de granularidade 9 e sensibilidade de 100 pares de linhas por centímetro. A fotografia obtida foi então digitalizada em um *scanner* HP Scanjet 4p, a uma

resolução de 400 pontos por polegada (DPI) em 3 canais (vermelho, verde e azul) de 8 bits, de modo a produzir uma imagem digital no formato JPEG (posteriormente convertida para o formato do programa ER-Mapper) de boa resolução espacial, na qual as feições presentes fossem óbvias e não muito grandes, permitindo testar filtros de dimensões relativamente pequenas para o realce tonal, o que reduz consideravelmente o tempo de filtragem, como será visto mais adiante.

Para o teste dos filtros passa baixas foram utilizados operadores de diversas dimensões, tendo sido escolhidas quatro das imagens, obtidas pelos operadores de 45x45, 65x65, 101x101 e 201x201 células, consideradas suficientes para exemplificar os resultados de aplicação de filtros de diferentes dimensões.

Na montagem de cada imagem foi sempre utilizado um mesmo operador para cada canal, pois o objetivo deste ensaio foi o de comparar as composições coloridas, e não cada canal em separado.

Após a aplicação dos filtros em cada um dos canais (vermelho, verde e azul) os níveis de cinza presentes foram reescalados para a faixa de 0 a 255. Posteriormente foram aplicados os cinco tipos mais comuns de aumento de contraste (linear, equalização de histograma, gaussiano, logarítmico e exponencial), a fim de permitir uma comparação o mais completa possível entre a imagem original e cada uma das imagens obtidas por filtragem.

Aumentos bi-lineares ou multi-lineares de contraste não foram utilizados, por não existir uma forma de “padronizar” sua aplicação, de modo que todas as imagens fossem tratadas com os mesmos parâmetros, tornando-se portanto mais difícil e menos confiável a comparação dos resultados.

No aumento linear de contraste os tons de cinza originais são redistribuídos para o espaço de 256 tons segundo uma curva de transferência linear, recebendo todos os *pixels* da imagem o mesmo grau de realce, à exceção de uma porcentagem, pré-determinada pelo operador, dos tons muito claros ou escuros. Para a aplicação deste tipo de aumento de contraste, foi desprezado 1% da informação tonal presente em cada uma das imagens, provocando um *overflow* de 0,5% no nível de cinza 255 (branco) e de 0,5% no nível de cinza 0 (negro), de forma a produzir o máximo realce possível, perdendo o mínimo de informação devido ao *overflow*.

Já no aumento logarítmico de contraste, a curva de transferência é logarítmica, comprimindo a informação referente às áreas mais escuras da imagem e realçando ao máximo as áreas mais claras, ao contrário do que ocorre no caso do aumento exponencial, onde se tem um

realce mais bem marcado nas porções da imagem que apresentam tonalidades mais escuras, com uma compressão da informação correspondente aos tons mais claros.

No realce de contraste por normalização de histograma (também denominado aumento gaussiano de contraste), produz-se nova imagem cujo histograma corresponde a uma curva de distribuição normal, considerando, na transformação, um número predeterminado de desvios padrão além e aquém da média do histograma original. Os tons de cinza mais realçados serão aqueles que estiverem fora dos limites desta faixa, ou seja, as áreas mais claras e escuras da imagem.

Finalmente, na equalização de histograma os tons de cinza que aparecem com maior frequência na imagem recebem um realce maior, de forma que as informações mais frequentes fiquem mais contrastadas. Nesse tipo de realce, procura-se que todos os tons de cinza presentes na imagem apareçam com igual frequência (Crósta, 1993).

Para os filtros passa altas, foram utilizados os mesmos experimentos que para os passa baixas, entretanto as dimensões de operadores utilizadas foram outras. Estes filtros prestam-se ao realce de bordas, feições que se fazem notar por variações tonais locais, menos amplas do que as feições espectrais que limitam, de modo que as dimensões dos operadores passa altas devem ser necessariamente menores do que as dimensões dos passa baixas utilizados no realce tonal. No realce de contraste foi aplicado apenas o método de equalização de histograma, que apresentou os melhores resultados no universo testado.

IV.3.2 Aplicação na área de testes

Em uma segunda etapa dos testes foram aplicados diversos filtros passa altas e passa baixas a uma área de 1096 x 836 *pixels* da imagem TM-Landsat (WRS 222/81 de 20/08/1988) da região das Minas do Camaquã.

Para os filtros passa altas foram analisadas as imagens filtradas isoladamente e montadas composições coloridas com imagens filtradas e não filtradas a fim de verificar o realce de bordas produzido.

No caso dos filtros passa baixas, foram aplicados operadores de diversas dimensões a todas as bandas disponíveis (neste caso, as bandas TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 e nas imagens geradas por análise de principais componentes das bandas TM). Uma vez obtidas as imagens

filtradas, foram montadas composições coloridas, as quais foram comparadas com composições das bandas originais (sem aplicação de filtro).

IV.4. Produção do mapa fotogeológico

Para a produção do mapa fotogeológico optou-se pela aplicação da mesma composição utilizada por Silva Filho (1997), qual seja a montagem de um triplete com três componentes principais (PC1/PC2/PC4 em RGB), porém com a aplicação de filtragens passa baixas com operador de 101x101 células (anexo 3), de modo a gerar um produto comparável com aquele em que foi baseado o trabalho citado.

Considerando a necessidade de adição de altas frequências e do princípio de realce da informação tonal original, a cada um dos canais foi somada a imagem original correspondente (PC1 no vermelho, PC2 no verde e PC4 no azul), sendo que os canais verde e azul foram ainda multiplicados pela PC1.

Uma vez impressa a composição em escala 1:50.000, a mesma foi interpretada em mesa de luz. O mapa assim obtido foi então digitalizado, vetorizado e tratado para produzir o mapa fotogeológico apresentado (figura 44).

De modo a avaliar a qualidade do produto obtido, o mesmo foi comparado visualmente com os mapas geológicos da região elaborados por Silva Filho (1997) e Fambrini (1998).

Além da imagem apresentada no anexo 3, foi produzida uma segunda imagem (anexo 4) com as bandas TM4/TM3/TM7 em RGB, com aplicação de filtro passa baixas proporcional de 65x65 células, com adição de 1,5 vezes a imagem original para cada banda e a primeira componente principal no canal de intensidade, a qual foi discutida comparativamente com relação à anteriormente citada (anexo 3).

V Resultados Obtidos e Discussão

Para a apresentação dos resultados dos testes citados, este capítulo será dividido em três itens, referindo-se às diferentes abordagens descritas na metodologia

V.1 Verificação das premissas básicas

Foi testada a premissa de que uma imagem submetida a um filtro passa altas de dimensões $n \times n$ excluiria uma informação tonal, a qual estaria presente na imagem filtrada por passa baixas de iguais dimensões. Assim, a soma destas duas imagens filtradas teria, idealmente, 100% de correlação com a imagem original, fato que foi constatado com grande precisão nos testes efetuados, mantendo uma correlação total entre a imagem original e a soma das imagens filtradas até a terceira casa decimal. Esta operação fornece segurança tanto na elaboração dos filtros propostos - pois indica que não estão introduzindo distorções, e que a geometria dos operadores é válida - quanto nas discussões deste capítulo.

V.2 Testes quantitativos

Os testes qualitativos foram feitos segundo dois enfoques distintos, quais sejam a análise do grau de correlação entre imagens filtradas e a imagem original, feito através do cálculo da matriz de correlação, e perfis de DN's, conforme descrito a seguir.

V.2.1 Análises de correlação

Inicialmente foi feita a análise do grau de correlação que cada imagem gerada por filtragens passa altas apresenta quando comparada à imagem original, produzindo os dados apresentados na tabela 1. Para esta análise foi utilizada a banda TM4 da área de testes.

Dimensões do filtro	Número de células	Correlação com TM4
3x3	9	0,528
5x5	25	0,636
9x9	81	0,753
13x13	169	0,814
17x17	289	0,850
21x21	441	0,875
25x25	625	0,892
29x29	841	0,905
33x33	1089	0,915
37x37	1369	0,923
41x41	1681	0,929
45x45	2025	0,934
51x51	2601	0,941
57x57	3249	0,946
63x63	3969	0,951
69x69	4761	0,955
77x77	5929	0,959
85x85	7225	0,963
93x93	8649	0,966
103x103	10609	0,969
115x115	13225	0,972
129x129	16641	0,975
145x145	21025	0,978
163x163	26569	0,981
183x183	33489	0,983
205x205	42025	0,985
229x229	52441	0,987
255x255	65025	0,989

Tabela 1: comparativo do grau de correlação entre as imagens processadas com o número de células dos diversos filtros passa altas e a imagem original da banda TM4

Pode-se observar, portanto, que o grau de correlação aumenta rapidamente conforme aumentam as dimensões do operador, fato que, embora seja previsível, indica que os filtros não estão introduzindo distorções ou gerando artefatos de forma significativa na imagem processada.

A partir desses dados foi possível produzir o gráfico apresentado a seguir, que relaciona o grau de correlação de cada imagem gerada comparada à imagem original com as dimensões do operador (figura 20).

Figura 20: gráfico relacionando o número de células do operador e o grau de correlação entre a imagem filtrada e a imagem original

Testes efetuados em outras áreas e com outras bandas produzem sempre o mesmo tipo de curva, cuja equação infelizmente não pôde ser calculada neste trabalho. Caso a equação tivesse sido extraída, seria possível prever com maior segurança as dimensões ideais do operador a ser aplicado em uma determinada imagem, tendo em vista o tipo de informação que se pretende obter ou eliminar.

No caso de filtragens passa baixas, a curva comparativa do grau de correlação é oposta, pois a informação que é excluída em uma filtragem passa altas é integralmente mantida na filtragem passa baixas correspondente e vice versa, conforme comprovado no item V.1. Assim, espera-se que a correlação entre uma imagem de sensoriamento remoto filtrada com filtro passa baixas proporcional seja sempre baixa tendendo a diminuir com o aumento das dimensões do operador.

Este fato pode ser verificado através da análise dos diagramas de dispersão apresentados a seguir (figura 21) que correlacionam a imagem filtrada com operador proporcional de 31x31 células e de 255x255 células com a imagem que a gerou (banda TM3 da área de testes). Pode-se notar que o diagrama de dispersão da filtragem com operador de 31x31 células apresenta dispersão e ângulo do eixo principal menores que no caso da filtragem com operador de 255x255 células, o que indica a menor correlação da imagem filtrada com a original no segundo caso do

que no primeiro. Em termos puramente numéricos, para a banda TM3, na área de testes essas correlações são de 63,6% para o operador de 31x31 células contra apenas 40,9% para o operador de 255x255 células.

Figura 21: diagramas de dispersão mostrando a correlação existente entre a imagem TM3 e a mesma imagem filtrada com operadores passa baixas de 31x31 e de 255x255 células.

Este tipo de análise, entretanto, varia de acordo com o dado original. O mesmo tipo de análise feito para a quarta componente principal, na mesma área, mostra que, neste caso, a correlação é consideravelmente menor que a observada para a banda TM3, conforme pode ser visto na figura 22.

Figura 22: diagramas de dispersão mostrando a correlação existente entre a imagem PC4 e a mesma imagem filtrada com operadores passa baixas de 31x31 e de 101x101 células.

Numericamente, a correlação entre a imagem original e as imagens filtradas, no caso da PC4, é de 29,4% para a filtragem com operador de 31×31 células e de 23,3% para o operador de 101×101 . O fato do grau de correlação ser mais baixo na análise feita para a quarta componente principal do que para a TM3 pode ser explicado pela grande quantidade de ruído existente na PC4. Conforme comentado anteriormente, ruídos são feições de alta frequência, que tendem a ser eliminadas quando aplicadas filtragens do tipo passa baixas. Desse modo, é esperado que uma imagem que apresenta grande quantidade de ruído, quando tratada com filtro passa baixas, gere um dado menos correlacionável com o original do que partindo-se de uma imagem com pouco ou nenhum ruído.

V.2.2 Perfis de DN's

Para este tipo de análise foram feitos perfis de DN's em diversas bandas TM e principais componentes da imagem da área de testes, tendo sido selecionadas algumas das mais significativas para serem discutidas. Para efeito de comparação, todos os perfis referem-se às mesmas coordenadas da imagem. Os valores de DN's dos perfis encontram-se reescalados para 256 tons de cinza, o que não implica em distorções na análise, posto que o reescalamento foi feito de forma linear e o objetivo do ensaio é avaliar as variações de frequência e não os valores de DN gerados pelas filtragens.

A figura 23 apresenta dois perfis de DN's, sendo o inferior da banda TM4 original, sem filtragem, e o superior, da mesma banda com a aplicação de filtragem com operador de 65×65 células.

Inicialmente pode-se observar a grande redução das frequências de variação tonal mais altas, restando apenas as baixas, com a aplicação do filtro. Estas, por sua vez, encontram correspondência no perfil da imagem original, indicando não haverem distorções significativas oriundas do processo de filtragem.

As feições de baixa frequência presentes são de difícil visualização na imagem original, mas podem ser observadas com facilidade na filtrada, inclusive com gradientes mais altos de variação, o que indica a presença de realce de tais feições.

Figura 23: perfis de DN's da banda TM4 filtrada com operador passa baixas de 65x65 células (acima) e original (abaixo).

Na análise do comportamento dos filtros sobre imagens de componentes principais, foram encontrados dois comportamentos consideravelmente distintos, sendo um, mais coerente, representado pela PC1 (figura 24) e outro, que apresenta problemas de interpretação, representado pela PC4 (figura 25).

Na primeira (figura 24) pode-se observar basicamente os mesmos fenômenos de eliminação das altas frequências e realce das baixas descritos para a figura 23 porém, como a primeira componente principal corresponde fundamentalmente ao albedo, onde as variações de alta frequência são mais intensas, os resultados das filtragens passa baixas são mais nítidos.

Note-se ainda que a aplicação de filtragens com operadores de diferentes dimensões resulta na atenuação ou eliminação de diferentes faixas de frequência, sendo que, feições que apresentam comportamento de baixa frequência de variação tonal frente a um operador de 31x31 células comportam-se como de alta frequência quando aplicado o operador de 101x101 células (destaque na figura 24).

Figura 24: perfis de DN's da primeira componente principal, mostrando a imagem original (acima), e as filtradas com operadores passa baixas de 31x31 células (intermediária) e de 101x101 células (abaixo). Em destaque, diferença entre as filtragens com operadores de 31x31 e de 101x101 células.

Na figura 25, por sua vez, são apresentados perfis da quarta componente principal, com aplicação dos mesmos filtros que na figura 24, porém a correlação entre os perfis da imagem original e das imagens filtradas é consideravelmente mais difícil de ser notada. Este fato deve-se, provavelmente à grande quantidade de ruídos presente na imagem original, o que mascara a presença das baixas frequências. Conforme comentado anteriormente, a correlação da PC4

original com suas filtragens passa baixas é muito pequena, pois os ruídos são associados às altas frequências de variação tonal.

Figura 25: perfis de DN's da quarta componente principal, mostrando a imagem original (acima), e as filtradas com operadores passa baixas de 31x31 células (intermediária) e de 101x101 células (abaixo).

V.3 Testes qualitativos

Conforme exposto no capítulo anterior (materiais e métodos), os estudos do ponto de vista qualitativo, visual, foram feitos sobre duas imagens de natureza distinta, sendo a primeira, uma imagem simples e didática, enquanto que a segunda representa um exemplo de aplicação prática na área de sensoriamento remoto voltado às geociências.

V.3.1 Imagem didática

Para tipo de análise foi utilizada a fotografia da chama de uma vela, a qual foi tratada com filtros passa baixas e passa altas, fornecendo os resultados expostos a seguir.

V.3.1.1 Filtros passa baixas

Para o estudo do comportamento dos filtros passa baixas foram utilizados operadores de quatro dimensões diferentes e cinco tipos de aumento de contraste diferentes. Este item será subdividido segundo os tipos de aumento de contraste, de modo a permitir a comparação dos produtos obtidos com os diferentes operadores mantendo sempre os demais parâmetros idênticos para cada conjunto de imagens.

a) Aumento linear de contraste

A figura 26 mostra os resultados obtidos com esse tipo de aumento de contraste.

Nesta figura observa-se inicialmente que esse tipo de aumento de contraste é bastante suave, não permitindo a clara visualização do zoneamento de cores presente.

Pode-se notar, entretanto, que a porção basal da chama apresenta uma graduação de cores que vai desde o vermelho até o branco, passando por diversos tons de amarelo (obtido da soma, em diferentes proporções, entre vermelho e verde). Ao comparar a imagem 1 (sem filtro) com as imagens 2 (filtro de 45x45 células) e 3 (filtro de 65x65 células), nota-se que nas imagens filtradas a intensidade das cores é maior o que indica que a informação tonal encontra-se mais realçada, conforme era esperado.

Figura 26: imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento linear de contraste, sendo:

- 1 - imagem original
- 2 - após a aplicação de filtro de 45x45 células
- 3 - após a aplicação de filtro de 65x65 células
- 4 - após a aplicação de filtro de 101x101 células
- 5 - após a aplicação de filtro de 201x201 células

No caso da imagem 4 (filtro de 101x101 células), o fenômeno de “desfocagem” da imagem é muito forte, devido às dimensões do operador utilizado, podendo-se observar que embora a informação de cor esteja realçada, como nas imagens 2 e 3, as bordas presentes não são nítidas, prejudicando a interpretação. Da mesma forma, a faixa amarela central da chama, presente de forma muito tênue na imagem 1, ligeiramente realçada na 2, e atenuada na 3, desaparece por completo agora, na imagem 4.

A imagem 5 (filtro de 201x201 células), por sua vez, apresenta as feições internas e o contorno externo da chama visíveis, mas distorcidos a ponto de modificar significativamente a forma destas feições, devido às dimensões do operador serem muito grandes, incluindo, no cálculo de cada *pixel*, valores de pontos que não apresentam nenhuma correlação com o *pixel* original. Pode-se notar, por exemplo, que o contorno inferior da chama, originalmente côncavo, torna-se convexo, devido ao fato de que no processo de convolução, para o cálculo dos *pixels* das porções mais estreitas (dois bicos laterais da base da chama), a maior parte das células utilizadas contém informações do fundo, e não da chama.

b) Aumento logarítmico de contraste

Pode-se observar na figura 27 que a área central (de maior energia) da chama ficou demasiado clara, conforme esperado com a aplicação do aumento logarítmico de contraste, não permitindo a visualização de qualquer feição que porventura estivesse presente. Entretanto, a base da chama apresenta um bom nível de realce, permitindo a visualização bastante nítida da variação de cores ali presente.

Figura 27: imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento logarítmico de contraste, sendo:

- 1 - imagem original
- 2 - após a aplicação de filtro de 45x45 células
- 3 - após a aplicação de filtro de 65x65 células
- 4 - após a aplicação de filtro de 101x101 células
- 5 - após a aplicação de filtro de 201x201 células

Neste sentido, comparando-se agora a imagem original (1) com as demais, pode-se verificar um sensível realce das feições que aparecem em vermelho e amarelo em todas as imagens filtradas, sendo que na imagem 5 (na qual foi aplicado o maior filtro, de 201x201 células), e com menor intensidade na 4 (filtro de 101x101 células), tais feições sofreram uma distorção, conforme observado no caso do aumento linear de contraste.

A figura a seguir (28) traz as mesmas imagens mostradas na figura 27, porém ampliando a porção de topo da chama. Pode-se observar que nesta região existe uma feição em amarelo,

com uma pequena borda em vermelho, que aparece bem marcada ainda na imagem original (A). Na imagem filtrada com operador de 45×45 células (B), nota-se que a borda em vermelho aparece fortemente realçada, enquanto que a área amarela, além de um nítido realce, apresenta ainda pelo menos duas subdivisões. Outro fato notável neste exemplo é que, quando se processa a filtragem, há uma perda de informação no ponto mais alto da chama, perda essa que cresce com o aumento das dimensões do filtro aplicado. No caso da imagem B, essa perda é da ordem de 9 *pixels*, passando para 14 *pixels* na imagem C, 24 na imagem D e chegando a 57 *pixels* na imagem E. Esse fenômeno pode ser explicado devido ao fato de que, quando os *pixels* mais altos da chama estão sendo recalculados durante o processo de convolução, a maioria dos *pixels* utilizados no cálculo pertencem ao fundo, e não à chama propriamente dita. Desse modo pode-se dizer que este processo de filtragem reduz a dimensão espacial do objeto, intensificando sua informação tonal.

Figura 28: ampliação da figura 27 na porção do topo da chama.

- A - imagem original
- B - após a aplicação de filtro de 45×45 células
- C - após a aplicação de filtro de 65×65 células
- D - após a aplicação de filtro de 101×101 células
- E - após a aplicação de filtro de 201×201 células
- F - imagem E deslocada para melhor visualização

No caso da imagem C, obtida através da aplicação de um filtro de 65x65 células, observa-se os mesmos fenômenos descritos para a imagem B, porém o realce das tonalidades presentes é ainda maior, e a subdivisão da área amarela em áreas distintas se faz notar com maior nitidez.

Já na imagem D (101x101 células) a borda em vermelho já não aparece com a mesma intensidade que na imagem C, e a área amarela apresenta uma tonalidade mais esmaecida e uma quantidade maior de subdivisões, as quais não se pode afirmar que representem feições naturais, pois a variação tonal é muito discreta e a forma, demasiado regular e paralela à borda da chama, sugerindo representar artefatos gerados pelo processo de filtragem.

A imagem E, por sua vez, mostra bem a perda dos *pixels* da parte mais alta da chama, que aqui chega a 57 *pixels* em relação à imagem original (A), por esse motivo foi incluída a imagem F, obtida da mesma forma que a imagem E, entretanto com um deslocamento para cima, para que possam ser analisados os demais efeitos de uma filtragem com operador de 201x201 *pixels*. Neste caso observa-se que a informação tonal da chama encontra-se ainda mais misturada com a do fundo do que na imagem D, produzindo tons ainda mais mistos, desaparecendo por completo a borda vermelha e fazendo com que surjam subdivisões mais bem marcadas e com alternância de tons que não podem corresponder a variações de temperatura. Assim, pode-se afirmar serem artefatos gerados pelo processo de filtragem com operador de dimensões impróprias para o realce das feições originalmente existentes.

c) Aumento exponencial de contraste

Neste caso (figura 29), observa-se claramente que com o aumento exponencial de contraste as imagens filtradas apresentam uma intensificação da informação tonal, quando comparadas com a imagem original (1), além do fenômeno de redução das dimensões da chama, descrito para o realce logarítmico. Quando se observa a imagem 2 e, ainda mais, a imagem 3, percebe-se que toda a informação relativa à matiz presente encontra-se fortemente realçada, seja para as feições presentes na borda da chama, seja para a informação tonal do interior da chama.

Na base da chama, por exemplo, pode-se verificar que as faixas presentes em tonalidades de vermelho e amarelo aparecem mais homogeneizadas nas imagens 2 e 3 do que na imagem 1. Pode-se verificar, ainda, que as duas “pontas” presentes são mais visíveis, apresentando-se mais contrastadas com relação ao fundo nas imagens 2 e 3 do que na original.

Figura 29: imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento exponencial de contraste, sendo:

- 1 - imagem original
- 2 - após a aplicação de filtro de 45x45 células
- 3 - após a aplicação de filtro de 65x65 células
- 4 - após a aplicação de filtro de 101x101 células
- 5 - após a aplicação de filtro de 201x201 células

As duas áreas laterais em branco, presentes na porção mediana da chama, também aparecem mais nitidamente nas imagens filtradas.

Quanto às imagens 4 e 5, pode-se verificar, como nos exemplos anteriores, que estas dimensões de operador são impróprias para a imagem tomada como exemplo, por apresentarem dimensões muito grandes, reduzindo o tamanho do objeto e distorcendo a forma das feições mais finas presentes na imagem original (as duas pontas presentes na base, por exemplo).

d) Aumento de contraste por normalização de histograma

Pode-se verificar na imagem 1 da figura 30 que com a normalização do histograma o fundo e as bordas da chama sofreram realce, sendo possível notar a presença de uma faixa em tonalidades pardas ao longo de toda a borda da chama. A porção mais interior da chama também aparece com um discreto realce na imagem 1, quando comparada com a imagem 1 das figuras anteriores.

Observando-se as imagens filtradas nota-se que a borda lateral da chama desaparece mesmo quando é aplicado o filtro de 45×45 células (imagem 2). Quanto à área parda da base da chama, esta aparece bem definida na imagem original, mas apresenta realce de feições internas e pode ser delimitada com maior facilidade nas imagens filtradas 2 e 3. Esta feição também está presente também na imagem 4, embora distorcida, e na imagem 5 já aparece de forma tênue e bastante deformada.

Figura 30: imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento de contraste por normalização de histograma, sendo:

- 1 - imagem original
- 2 - após a aplicação de filtro de 45×45 células
- 3 - após a aplicação de filtro de 65×65 células
- 4 - após a aplicação de filtro de 101×101 células
- 5 - após a aplicação de filtro de 201×201 células

Na porção central da chama, observa-se uma área com contornos mal definidos na imagem original, dividida em tons de azul e vermelho. Nas imagens filtradas 2, 3 e 4 tal área aparece com os contornos bem marcados e com uma clara diferenciação de suas subdivisões em vermelho, azul e amarelo, sendo que na imagem 2 a forma aparece mais definida que nas demais, nas quais diminui de tamanho ao ponto de aparecer como uma pequena mancha clara na imagem 5. Este exemplo, em particular, pode ser tomado como um exemplo claro do realce tonal obtido pela filtragem passa baixa.

e) Aumento de contraste por equalização de histograma

Este foi considerado o melhor procedimento para o aumento de contraste da imagem em questão. Na figura 31 podem ser observar praticamente todos os fenômenos descritos anteriormente para as imagens filtradas, porém com maior clareza.

Figura 31: imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa baixas proporcional, todas com aumento de contraste por equalização de histograma, sendo:

- 1 - imagem original
- 2 - após a aplicação de filtro de 45x45 células
- 3 - após a aplicação de filtro de 65x65 células
- 4 - após a aplicação de filtro de 101x101 células
- 5 - após a aplicação de filtro de 201x201 células

Observando-se, por exemplo, a porção de topo da chama (figura 32), verifica-se que as diferentes subdivisões da porção de topo da chama, pouco nítidas na imagem original (A) tornam-se claramente visíveis nas imagens filtradas B, C e até mesmo D, embora a pequena borda negra que aparece na imagem A tenha sido mesclada com o fundo parcial (B) ou totalmente (C, D e E) quando da aplicação dos filtros. Na imagem E ocorrem evidentes artefatos.

Figura 32: ampliação da figura 31 na porção do topo da chama.

- A - imagem original
- B - após a aplicação de filtro de 45x45 células
- C - após a aplicação de filtro de 65x65 células
- D - após a aplicação de filtro de 101x101 células
- E - após a aplicação de filtro de 201x201 células

Na porção de base da chama, por sua vez, como pode-se observar na figura 33, verifica-se que os diversos níveis presentes aparecem bastante realçados nas imagens B, C e D, embora neste último caso a forma já esteja bastante distorcida devido, conforme comentado anteriormente, às dimensões impróprias do operador. Um caso extremo, devido a tal distorção, pode ser observado na imagem E, na qual a forma originalmente côncava da base da chama torna-se convexa devido à filtragem imprópria. Nesta mesma imagem (E), pode-se observar que o zoneamento interno de cores presente na base da chama é também deformado, tornando-se também convexo, como o contorno externo. Este exemplo mostra claramente a necessidade de se adequar o tamanho do operador a ser utilizado às dimensões das feições sobre as quais se pretende obter realce.

Com base nos exemplos expostos (figuras 26 a 33), pode-se concluir que a aplicação de filtros passa baixas pode produzir realce da informação tonal contida na imagem.

A análise em grandes ampliações das imagens presentes nesses exemplos permite contar efetivamente o número de *pixels* que compõem cada uma das feições presentes. Assim, foi possível estimar que um operador passa baixas é capaz de realçar feições que possuam pelo menos a metade das suas dimensões (em termos de *pixels*). Ou seja, o operador de 45x45 permite o realce de feições que tenham dimensões iguais ou superiores a 22 x 22 *pixels*, enquanto que o operador de 65x65 permite realçar feições de 32 x 32 *pixels* ou mais.

Figura 33: ampliação da figura 31 na porção da base da chama.
 A - imagem original
 B - após a aplicação de filtro de 45x45 células
 C - após a aplicação de filtro de 65x65 células
 D - após a aplicação de filtro de 101x101 células
 E - após a aplicação de filtro de 201x201 células

Pode-se concluir ainda que a aplicação de filtros passa baixas altera a forma e as dimensões das feições presentes na imagem em uma relação direta com as dimensões do operador.

V.3.1.2 Filtros passa altas

Neste caso, serão apresentadas apenas as imagens obtidas com aumento de contraste por equalização de histograma, técnica que forneceu melhores resultados, como no item anterior.

A figura 34 mostra quatro imagens filtradas com operadores passa altas com dimensões de 7x7 (imagem A), 15x15 (imagem B), 31x31 (imagem C) e 61x61 (imagem D) células. A imagem original não foi colocada ao lado das imagens filtradas pois o tipo de informação

realçada refere-se principalmente às feições de borda da chama, não necessitando de muitas comparações, entretanto caso seja necessário, a mesma pode ser encontrada na figura 31.

Note-se que a informação tonal originalmente presente na imagem da chama desaparece quando da aplicação dos menores filtros passa altas (imagens A e B), pois, considerando-se a resolução da imagem em questão e dimensões de operadores entre 7×7 e 15×15 , esse tipo de informação relaciona-se às baixas frequências de variação tonal. Quando aplicados operadores maiores (imagens C e D), a informação espectral referente às diferentes feições tonais presentes na base da chama começa a aparecer na imagem C (operador de 31×31 células), apresentando-se já bem visível na imagem D (operador de 61×61 células). A imagem D demonstra visualmente que, com o aumento do operador, aumenta a correlação com a imagem original, já que aumenta progressivamente o número de feições consideradas na filtragem como de alta frequência.

Figura 34: imagens da chama de uma vela com a aplicação de filtro passa altas proporcional, todas com aumento de contraste por equalização de histograma, sendo:

- A - após a aplicação de filtro de 7×7 células
- B - após a aplicação de filtro de 15×15 células
- C - após a aplicação de filtro de 31×31 células
- D - após a aplicação de filtro de 61×61 células

Quanto à borda da chama, esta encontra-se realçada nas quatro imagens expostas, porém sua espessura varia de acordo com as dimensões do operador utilizado, tornando-se mais espessa nas imagens C e D, respectivamente. Pode-se notar ainda que, na porção de topo da chama (figura 35), as feições de borda descritas na discussão dos filtros passa baixas aparecem com um grande realce nas imagens C e D, e com realce menor na imagem B. Isso deve-se ao fato de que tais feições possuem espessura (medida em *pixels*) demasiado grande para o operador de 7x7, estando no limite da sensibilidade do operador de 15x15 células.

Figura 35: ampliação da figura 34 na porção do topo da chama.

- A - após a aplicação de filtro de 7x7 células
- B - após a aplicação de filtro de 15x15 células
- C - após a aplicação de filtro de 31x31 células
- D - após a aplicação de filtro de 61x61 células

V.3.2 Aplicação na área de testes

Quanto à análise visual dos produtos gerados são apresentadas, na figura 36, três imagens da área localizada imediatamente ao sul das minas do Camaquã, sendo que a primeira (figura 36A) corresponde à banda TM4, sem filtragem, apenas com aumento de contraste por equalização de histograma. Nas imagens 36B e 36C são apresentadas filtrações passa altas e passa baixas, respectivamente, ambas com operador de 77x77 células, aplicadas sobre a mesma área e banda da imagem 36A. A escala gráfica da figura vale para as três imagens.

Figura 36: imagens dos arredores das minas do Camaquã, apresentando a banda TM4 original, sem filtragem (A), a mesma imagem com aplicação de filtro passa altas de 77x77 células (B) e com aplicação de filtro passa baixas de 77x77 células (C).

Note-se que grande parte informação tonal presente na imagem 36A, que permite a separação de unidades fotogeológicas é perdida quando aplicado o filtro passa altas (imagem 36B). Em contrapartida, a informação textural presente na imagem 36A encontra-se fortemente realçada na imagem 36B, apresentando um padrão radial de drenagem fortemente marcado, de difícil observação na imagem não filtrada (36A). A imagem 36C, por sua vez, contém a informação tonal que havia sido perdida na filtragem passa altas, porém não apresenta os elementos de textura (relacionados às altas frequências) necessários à interpretação fotogeológica. Assim sendo, torna-se necessário adicionar informação de albedo para a interpretação da imagem filtrada com operadores passa baixas.

Verifica-se, assim, que a premissa na qual esta pesquisa é baseada, a de que a informação tonal, que representa a resposta espectral dos materiais superficiais em imagens de sensoriamento remoto, relaciona-se às baixas frequências, podendo ser realçada por filtros passa baixas, está essencialmente correta.

Na figura 37 são apresentados cinco exemplos de filtrações passa altas efetuadas sobre a banda TM4. As imagens 37A, B1, C, D e E correspondem a filtrações com operadores de 5x5, 17x17, 93x93, 183x183 e 255x255 células, respectivamente, enquanto que na imagem 37F é apresentada a banda original (TM4), sem filtrações, para efeito de comparação com as demais. Em todas as imagens da figura 37 foi aplicado o aumento de contraste por equalização de histograma. A escala gráfica da figura vale para as três imagens.

Inicialmente, pode-se notar que a diferença entre as imagens A e B é bastante acentuada, considerando-se um aumento nas dimensões do operador relativamente pequeno, em relação à diferença que pode ser vista entre as imagens B e E, cujo incremento nas dimensões do operador

é muito maior. Esse tipo de observação é esperada, considerando-se a curva do grau de correlação entre a imagem original e imagens filtradas com operadores passa altas, apresentada na figura 20. Observando-se a tabela de dados que deu origem à citada curva (tabela 1) pode-se verificar que a correlação com a imagem original de uma filtragem com operador de 5x5 células é da ordem de 64%, passando para 85% quando aplicado o operador de 17x17, o que representa uma diferença considerável (da ordem de 20%), para um incremento de 11,6 vezes no número de células do operador. Já a diferença do grau de correlação entre as filtrações que utilizam operadores de 17x17 e de 255x255 células é de apenas 14% para um incremento de 225 vezes no número de células do operador.

Figura 37: imagens da banda TM4 dos arredores da Mina do Camaquã, com a aplicação de filtros passa altas de 5x5 (A), 17x17 (B), 93x93 (C), 183x183 (D) e 255x255 (E). A imagem F corresponde à banda original, sem filtragem.

Analisando-se as imagens separadamente, pode-se observar que o operador de 5x5 células (figura 37A) realça fortemente a microtextura presente na imagem. Feições de alta frequência de variação tonal de dimensões da ordem de 2 a 3 *pixels* podem ser vistas com grande realce. Já o operador de 17x17 células (figura 37B), embora ainda realce feições bastante

delgadas, preserva feições maiores e permite o reconhecimento parcial de padrões texturais, os quais, entretanto, podem ser mais claramente visualizados nas figuras 37C, D e E. As imagens D e E já mantêm parte da informação tonal original (apresentada na imagem F).

A figura 38 apresenta exemplos de filtragens passa baixas aplicadas sobre a banda TM4, correspondendo a imagem A à banda TM4 original, a imagem D à primeira componente principal, cuja informação relaciona-se basicamente ao albedo, a imagem B à banda TM4 com a aplicação de filtragem passa baixas de 255x255 células, a imagem C à banda TM4 com a aplicação de filtragem passa baixas de 255x255 células e adição de 1,5 vezes a primeira componente principal (D), a imagem E à banda TM4 com a aplicação de filtragem passa baixas de 31x31 células, a imagem F à banda TM4 com a aplicação de filtragem passa baixas de 31x31 células e adição de 1,5 vezes a primeira componente principal.

Figura 38: imagens da banda TM4 dos arredores da Mina do Camaquã, com e sem a aplicação de filtros passa baixas, sendo:

- A – imagem da banda TM4 original, sem filtragem
- B – imagem A, com a aplicação de filtragem com operador de 255x255 células
- C – imagem A, com a aplicação de filtragem com operador de 255x255 células e soma de 1,5 vezes a primeira componente principal (D)
- D – primeira componente principal (albedo)
- E – imagem A, com a aplicação de filtragem com operador de 31x31 células
- F – imagem A, com a aplicação de filtragem com operador de 31x31 células e soma de 1,5 vezes a primeira componente principal (D)

Na comparação entre as imagens 38B e 38E pode-se observar que o filtro de 255x255 células, nesta área específica, é demasiado grande para o realce da feição mais clara presente na área central da imagem. Tal feição, embora apresente-se com um grande realce da informação tonal, aparece com forma arredondada na imagem B, enquanto que, aplicado um filtro menor (31x31 células – imagem E), os limites de tal feição aparecem mais bem definidos, respeitando a forma original, e apresentando-se também com grande realce da informação tonal. Feições menores tais como as duas áreas mais escuras presentes na porção superior, bem como o rio, localizado na porção inferior das imagens, aparecem com grande destaque na imagem E, sendo já mais dificilmente localizadas na imagem B.

Uma vez adicionada a informação de albedo (imagens C e F), entretanto, grande parte das distorções geradas pela aplicação de um operador de dimensões impróprias para a imagem considerada desaparecem ou são minimizadas (imagem C), mantendo-se ainda o realce tonal que se buscava, embora a filtragem com operador menor (imagem F) apresente ainda vantagens em relação à imagem C.

Conforme comentado anteriormente, observa-se a necessidade de adição de informação textural (albedo – imagem D) para a análise de imagens geradas por filtragens passa baixas (imagens B e E), de forma a obter, além de um realce tonal importante, uma quantidade de textura suficiente à interpretação (imagens C e F).

A aplicação de todos estes filtros permite tecer algumas considerações a respeito do funcionamento dos filtros passa altas e passa baixas e do que representam as frequências de variação tonal em uma imagem de sensoriamento remoto.

Vale observar, inicialmente, que o fato da correlação entre a imagem filtrada e a imagem original aumentar com o aumento das dimensões do operador, no caso de operadores passa altas, é devida ao fato de que um filtro de pequenas dimensões (entre 3x3 e 13x13) ressalta feições muito delgadas mas elimina feições tonais relativamente homogêneas de dimensões maiores que metade das dimensões do operador. Consequentemente, operadores pequenos cortam um volume de informação proporcionalmente maior.

Filtros de dimensões intermediárias (entre 17x17 e 69x69, grosso modo) ressaltam feições maiores, notadamente o aspecto textural da imagem, considerando-se uma imagem TM-Landsat.

Já os filtros de grandes dimensões realçam feições progressivamente maiores, produzindo, entretanto, um realce muito leve, chegando a ser quase imperceptível quando utilizados operadores excessivamente grandes.

Este fato é consequência direta da área de abrangência do filtro, posto que as operações efetuadas com um operador de 3×3 células abrange apenas 9 *pixels* da imagem por vez, enquanto que um operador de 255×255 células utiliza 65025 células para o cálculo de um único *pixel* da imagem. Assim, uma determinada feição de borda que tenha uma espessura de, por exemplo, 5 *pixels*, terá um comportamento de feição de baixa frequência quando aplicado um filtro de 3×3 células, perdendo realce ou mesmo sendo eliminada, enquanto que na aplicação de um filtro de 15×15 células, a mesma feição será realçada como feição de alta frequência.

Com base nestes dados, verifica-se que a utilização de um filtro dito "passa altas" não implica na eliminação de *todas* as baixas frequências da imagem, pois a variável *frequência* com a qual os elementos aparecem nas imagens é uma variável contínua e não discreta, não existindo, na prática, um limite físico que determine *o que é uma alta ou baixa frequência*.

Desse modo, conclui-se que os valores de frequência filtrados dependem não apenas da arquitetura do operador, mas também das suas dimensões e da relação entre a resolução espacial e a "rugosidade" ou textura da imagem.

Enquanto um filtro passa altas cujo operador tem apenas 3×3 células elimina 47,2% da informação original, o mesmo tipo de filtro, mas agora com um operador de 29×29 células elimina apenas 9,5%, ou seja, grande parte da informação considerada de "baixa frequência" na aplicação de um operador de 3×3 é considerada como de "alta frequência" quando o operador utilizado é de 29×29 células.

Verifica-se assim que um filtro passa altas elimina *amplitudes* maiores do que um determinado valor, pois a amplitude pode ser medida em unidades de distância (*pixels*), enquanto que a unidade de frequência seria a variação tonal por unidade de distância. Desse modo, os termos utilizados para definir os filtros deveriam ser baseados em valores de amplitudes das feições filtradas (ou eliminadas), e não em frequências baixas ou altas.

Na literatura básica de sensoriamento remoto este aspecto é considerado, já que se afirma que um determinado filtro passa altas realça estruturas de dimensões menores ou iguais à metade das dimensões do seu operador (Drury, 1993).

Outra análise feita na região das Minas do Camaquã foi baseada em composições coloridas de bandas TM e de componentes principais (figuras 39 a 43), sempre comparando

composições com e sem aplicação de filtros passa baixas, visando a avaliação dos resultados das filtragens em tripletes. As imagens estão em escala de 1:130.000, todas com o mesmo realce de contraste (equalização de histograma para todos os canais) e adição de um canal de intensidade, onde foi colocada a primeira componente principal visando fornecer as informações de albedo à composição.

As figuras 39 e 40 correspondem à composição TM4/TM3/TM7, em RGB, sendo que na primeira (figura 39) são apresentadas as bandas originais, sem aplicação de filtros, enquanto que na segunda, as três bandas TM foram submetidas a filtragens passa baixas com operador de 65x65 células.

Embora a figura 39 já seja uma composição bastante boa, permitindo identificar inúmeras feições fotogeológicas, a produção de um mapa fotogeológico a partir desta composição é difícil, pois os limites entre as diversas unidades nem sempre aparecem muito bem marcados. Já na imagem filtrada (figura 40), as características espectrais das diferentes unidades fotogeológicas aparecem realçadas, podendo ser visualizadas e delimitadas com maior facilidade.

Um bom exemplo disto é o embasamento, que abrange grande parte da área leste da imagem, que pode ser visto tanto na figura 39 (em tons de azul e vermelho) quanto na 40 (em tons de vermelho), porém, nesta última, aparece com grande destaque e com seus limites bem definidos.

Como era esperado, entretanto, informações pontuais, de pequena expressão espacial, tendem a ser perdidas quando da aplicação dos filtros passa baixas. Este fato pode ser claramente observado na porção sudoeste da imagem, entre as Minas do Camaquã (em verde, na porção centro-oeste das imagens) e o Rio Camaquã (que corta toda a porção sul das imagens, de leste a oeste), onde pode-se observar uma unidade em tons de cinza bem claros na figura 40, e que apresenta, na figura 39, pequenas manchas avermelhadas no seu interior. Esta unidade fotogeológica corresponde à Formação Santa Bárbara, a qual é composta, neste ponto, por arenitos finos a médios, com uma pequena cobertura de arenitos grossos nos picos (Gelson Luís Fambrini, informação verbal), que possivelmente correspondem às manchas vermelhas observadas na figura 39.

Figura39: Composição TM4R/TM3G/TM7B da área de testes, sem filtragens, com adição da primeira componente principal no canal de intensidade

1300 700 0 1300 2600 3900m

Figura 40: Composição TM4R/TM3G/TM7B da área de testes com aplicação de filtros passa baixas de 65x65 células nas três bandas, com adição da primeira componente principal, sem filtragem, no canal de intensidade

1300 700 0 1300 2600 3900m

As figuras 41 a 43, por sua vez, correspondem a tripletes montados com base em imagens selecionadas entre as componentes principais, conforme efetuado por Silva Filho (1997), formando a composição PC1/PC2/PC4 em RGB. Na primeira destas figuras foram utilizadas as imagens originais, sem filtragens; na segunda, as imagens foram submetidas a filtragens com operadores passa baixas proporcionais de 31x31 células e, na terceira, os operadores foram de 101x101 células.

Inicialmente, pode-se observar que a figura 41 apresenta uma imagem de difícil interpretação devido à enorme variabilidade de cores e pequenas feições, sendo as imagens presentes nas figuras 42 e 43 mais homogeneizadas, como era esperado pela remoção das altas frequências, o que facilita em muito a delimitação de unidades mapeáveis em campo. Em comparação com as figuras 39 e 40, as figuras 41 a 43 apresentam uma quantidade de feições fotogeológicas consideravelmente maior, sendo possível nestas (em particular nas figuras 42 e 43) delimitar unidades dentro do embasamento, as quais não eram observadas com as bandas TM.

Quanto à comparação entre as imagens filtradas (figuras 42 e 43), nota-se que diversas feições, com dimensões mapeáveis, que podem ser vistas na figura 42, desaparecem quando da aplicação do filtro de 101x101 células (figura 43), indicando que este filtro já apresenta dimensões excessivamente grandes para a imagem em questão, como pode ser verificado na porção central da imagem e no embasamento, por exemplo.

Por outro lado, feições de difícil delimitação na figura 42, tornam-se mais visíveis, adquirindo maior expressão em termos de área na figura 43, como por exemplo, a mancha amarelada na porção norte-nordeste da área, de delimitação relativamente fácil na figura 43, mas difícil de ser visualizada na anterior, devido ao padrão de cores variegado que apresenta. Tais feições, entretanto, também podem corresponder a uma homogeneização exagerada devida à filtragem com operadores muito grande. Áreas como essa necessitam ser analisadas em campo, a fim de verificar se as variações observáveis na figura 42 têm significado geológico e se o operador de 101x101 células, por abranger uma área muito grande, não reuniu sob um só padrão tonal, elementos naturais diversos.

Figura 41: Composição PC1R/PC2G/PC4B da área de testes, sem filtragens, com adição da primeira componente principal no canal de intensidade

1300 700 0 1300 2600 3900m

Figura 42: Composição PC1R/PC2G/PC4B da área de testes com aplicação de filtros passa baixas de 31x31 células nas três bandas, com adição da primeira componente principal, sem filtragem, no canal de intensidade

1300 700 0 1300 2600 3900m

Figura 43: Composição PC1R/PC2G/PC4B da área de testes com aplicação de filtros passa baixas de 101x101 células nas três bandas, com adição da primeira componente principal, sem filtragem, no canal de intensidade

1300 700 0 1300 2600 3900m

VI Análise do Mapa Fotogeológico

Uma vez efetuados todos os testes prévios de aplicação de filtragens foi composto um triplete da área de testes em escala 1:50.000 (anexo 3), seguindo a metodologia proposta por Silva Filho (1997), porém com a aplicação das filtragens passa baixas conforme descrita anteriormente. Desse modo é possível proceder a uma comparação entre o mapa fotogeológico produzido com a metodologia proposta (figura 44) e o mapa geológico (figura 2), o qual partiu da mesma composição de imagens TM-Landsat, sem a aplicação de filtros para realce tonal, mas que foi produzido com intenso trabalho de campo.

Inicialmente, cabe ressaltar que a informação de campo é sempre baseada em dados pontuais, sendo por vezes impraticável o acompanhamento de toda a extensão dos contatos geológicos através de caminhamentos no terreno. Desse modo, espera-se que os contatos fotogeológicos extraídos das imagens não correspondam exatamente àqueles traçados com base em informações de campo.

Por outro lado, as informações referentes às litologias presentes são confiáveis apenas quando devidamente verificadas em campo, pois a resposta dos materiais superficiais frente à radiação eletromagnética é extremamente variada, ainda mais em se considerando fatores como cobertura vegetal e ação antrópica, entre outros.

A comparação do mapa fotogeológico aqui produzido (figura 44) com os mapas geológicos de Silva Filho (1997) e Fambrini (1998) mostra claramente alguns dos aspectos já discutidos em capítulos anteriores. Entre eles, a questão dos contatos fotogeológicos merece destaque.

Pode-se observar, inicialmente, que as unidades fotogeológicas que apresentam correlação no mapa geológico (Silva Filho, 1997) normalmente têm contornos diferentes daqueles propostos no trabalho citado. Tais diferenças podem ser explicadas, em parte, pela natureza distinta dos dados, conforme comentado anteriormente.

Um exemplo típico deste tipo de discordância pode ser visto na área classificada por Silva Filho (*op. cit.*) como Formação Guaritas Superior, cuja área de abrangência é restrita à porção centro-norte e norte do mapa, enquanto que na imagem o mesmo padrão tonal e textural estende-se para noroeste, além da falha Tapera-Emiliano. Antônio Romalino Santos Fragoso Cesar (informação verbal) explica este fato considerando que uma pequena espessura dos sedimentos da Formação Guaritas Superior pode ser encontrada recobrando localmente áreas

mapeadas como Formação Guaritas Inferior, pois ocorrem sobre grandes lajedos, onde o acesso muitas vezes não é possível.

Outras discordâncias podem ser encontradas no tocante à presença de pequenas unidades fotogeológicas que não encontram correspondência nos mapas geológicos, como uma pequena área, com comportamento tonal semelhante ao do Corpo Andesítico Rodeio Velho, presente sobre a exposição da Formação Santa Bárbara localizada entre as Minas do Camaquã e o rio de mesmo nome. Neste ponto, em particular, Gelson Luís Fambrini (informação verbal) comenta haver um aumento da granulometria no topo da Fm. Santa Bárbara, sustentando o relevo - e portanto gerando o padrão de drenagens radial ali presente -, mas de abrangência restrita, não configurando uma outra unidade. Neste ponto, a aplicação de filtros passa baixas de grandes dimensões seguramente aumentou a expressão espacial dos corpos, gerando uma "falsa unidade".

Quanto à porção da área dominada pelo Grupo Porongos (embasamento), os mapas tomados para comparação não tiveram como objetivo detalhar sua geologia, marcando-a como uma unidade única, indivisa. Na imagem apresentada, entretanto podem-se separar diversas sub-unidades que provavelmente encontram correspondência na geologia local, dados os padrões tonais bastante diferenciados entre elas, e a forma, em alguns casos, sugerindo contatos tectônicos como por exemplo na porção sudeste da imagem, pouco a norte do Rio Camaquã, onde existe uma unidade fotogeológica praticamente norte-sul, limitada por falhamentos. Uma vez que não foram encontrados mapas detalhados do Grupo Porongos nesta região, apenas após checagem de campo seria possível afirmar quais as unidades fotogeológicas que de fato representam terrenos geologicamente distintos.

Na porção centro-oeste da imagem, pouco a nordeste das Minas do Camaquã, junto à falha Tapera-Emiliano pode ser vista uma área com um padrão tonal diferente do restante da imagem, com coloração acastanhada. Esta área não encontra correspondência nos mapas geológicos citados, podendo representar uma outra unidade não mapeada ou um problema relacionado à aplicação de filtros de grandes dimensões. Ocorre que nesta área existem diversas pequenas exposições de corpos andesíticos correlatas ao Rodeio Velho. Com a aplicação de filtros passa baixas a média entre as respostas tonais dos pequenos corpos andesíticos e das suas encaixantes pode ter gerado um padrão distinto das demais unidades.

Da comparação entre as imagens apresentadas nos anexos 3 e 4, pode-se observar basicamente que, como a composição entre componentes principais filtradas produz uma imagem com uma quantidade de processamentos distintos muito grande, perde-se parcialmente o contato com o dado original, gerando problemas à interpretação de algumas áreas, como é o caso

da área presente sobre a Formação Santa Bárbara, já comentada anteriormente, que apresenta comportamento tonal semelhante ao do Rodeio Velho, mas que na verdade corresponde a uma variação localizada daqueles arenitos. No anexo 4 pode-se verificar que tal área não apresenta diferenciação com relação às circunvizinhas. Outro exemplo sobre o qual, entretanto, não temos os dados de campo, corresponde à área do embasamento. Um ponto interessante a este respeito é a cobertura vegetal que ocorre sobre extensas áreas do embasamento, a qual pode ser verificada no anexo 4 pois, em se tratando de uma composição de bandas TM, e sabendo-se que a vegetação reflete fortemente a radiação correspondente à banda TM4 (infravermelho próximo), pode-se sugerir que as áreas que aparecem em tons de vermelho estejam mais recobertas de vegetação do que as demais. Assim sendo, não se pode afirmar, apenas com base nestas imagens, se a diferenciação verificada no embasamento representam de fato diferentes litologias ou apenas mudanças na cobertura vegetal.

Quanto à continuidade da formação Guaritas Superior para oeste da Falha Tapera-Emiliano, a composição entre bandas TM sugere a mesma interpretação, corroborando para a hipótese levantada anteriormente.

No tocante à área de coloração acastanhada presente na porção centro oeste na imagem do anexo 3, esta também aparece com um padrão claramente diferenciável na composição de bandas TM do anexo 4, indicando a necessidade de verificação de campo nesta região.

53°27'03"

53°10'30"

30°50'33"

Figura 44: mapa fotogeológico

Legenda baseada em: Fambrini (1998) e Silva Filho (1997)

VII Limitações do Enfoque Proposto

A principal limitação encontrada para a aplicação da metodologia descrita até o momento refere-se ao tempo de processamento necessário para a aplicação de filtros de grandes dimensões. A seguir, encontra-se uma tabela que mostra o tempo necessário para a aplicação de 28 filtros a uma imagem de 1090x1350 *pixels* em um microcomputador Pentium de 233 MHz, com 64 Mb de memória RAM, utilizando o programa ER-Mapper, em ambiente Windows95.

Operador	Número de células	Tempo (s)			Tempo Total (h)
		Aplicar	Salvar	Total	
3x3	9	7	14	21	0,005833
5x5	25	12	19	31	0,008611
9x9	81	24	38	62	0,017222
13x13	169	44	60	104	0,028889
17x17	289	67	84	151	0,041944
21x21	441	108	119	227	0,063056
25x25	625	148	173	321	0,089167
29x29	841	208	235	443	0,123056
33x33	1089	290	323	613	0,170278
37x37	1369	403	503	906	0,251667
41x41	1681	515	508	1023	0,284167
45x45	2025	599	601	1200	0,333333
51x51	2601	733	785	1518	0,421667
57x57	3249	922	1006	1928	0,535556
63x63	3969	1162	1245	2407	0,668611
69x69	4761	1389	1454	2843	0,789722
77x77	5929	1717	1795	3512	0,975556
85x85	7225	2058	2136	4194	1,165
93x93	8649	2373	2741	5114	1,420556
103x103	10609	3102	3274	6376	1,771111
115x115	13225	3567	4023	7590	2,108333
129x129	16641	4474	5160	9634	2,676111
145x145	21025	5730	6411	12141	3,3725
163x163	26569	7087	8060	15147	4,2075
183x183	33489	8820	10200	19020	5,283333
205x205	42025	10942	12136	23078	6,410556
229x229	52441	13230	14658	27888	7,746667
255x255	65025	16317	17984	34301	9,528056

Tabela 2: tempo necessário para a aplicação dos filtros descritos

Como pode ser observado na figura 45, o tempo de aplicação dos filtros cresce quase linearmente em relação ao número de células do operador. Calculando o número de operações aritméticas necessárias à aplicação de um filtro de 255x255 células na área em questão, observa-se serem necessárias 191.368.575.000 operações para o processamento de toda a área, o que explica o tempo de processamento necessário.

Figura 45: relação entre o número de células do operador e o tempo de processamento necessário.

Este problema, entretanto, não deve ser considerado como impeditivo para a aplicação da metodologia em questão, considerada a grande velocidade com que os equipamentos de computação vêm evoluindo. Os testes feitos utilizaram, conforme citado, um computador pessoal Pentium de 233 MHz. Atualmente já estão disponíveis no mercado processadores de 400 MHz (e certamente no momento da leitura deste texto estarão disponíveis processadores mais rápidos), além de placas e sistemas operacionais que permitem a utilização de até dois processadores Pentium de 333 MHz ou quatro de 200 MHz. Dessa forma, em breve será possível reduzir os tempos de processamento a um quinto do que foi obtido, ou talvez menos, utilizando equipamentos de custo acessível.

Quanto à análise da geologia da região das minas do Camaquã efetuada neste trabalho, o mapa fotogeológico obtido não pode ser tomado como mapa geológico, pois não foi feito o controle de campo indispensável para a caracterização das unidades fotogeológicas como unidades litológicas e/ou estratigráficas, bem como de seus contatos. Embora o autor considere que a confecção de um mapa geológico deve ser *obrigatoriamente* precedida de trabalhos de

campo, deve ser realçado o fato de que este consiste em trabalho metodológico, não tendo por objetivo refazer o mapeamento geológico da região das minas do Camaquã, mas sim, propor uma metodologia de tratamento de imagens e testá-la para fins de fotogeologia através da comparação com mapas e trabalhos previamente existentes, nos quais o controle de campo foi feito com grande intensidade e abrangência.

Outra dificuldade encontrada, a qual não pode ser solucionada no presente trabalho, já foi mencionada no texto, e refere-se ao cálculo da equação da curva que relaciona o número de células do operador e o grau de correlação entre a imagem gerada por um filtro passa altas e a imagem original;

VII - Conclusões

1. Os testes efetuados indicam que a arquitetura proposta tanto para os operadores passa altas quanto para os passa baixas está essencialmente correta, não gerando distorções significativas.
2. Os filtros passa baixas produzem realce das informações tonais de imagens de sensoriamento remoto.
3. Os realces obtidos pela aplicação de filtros passa baixas em imagens de sensoriamento remoto podem localmente não refletir a realidade do terreno, embora em escala mais ampla permitam uma melhor interpretação das imagens, com boa fidelidade.
4. A dimensão dos operadores, tanto passa altas quanto passa baixas, deve ser escolhida em função das dimensões das feições tonais, da textura e da resolução da imagem a ser estudada.
5. Para a produção de imagens com realce tonal é imprescindível a adição de albedo, pois este fornece as informações de alta frequência imprescindíveis à interpretação no que se refere à textura, limites das feições tonais e elementos de localização (estradas, rios etc.).

VIII. Referências Bibliográficas

- COLWELL, R. N. (Ed.) (1983) **Manual of Remote Sensing and Photointerpretation**. American Society of Photogrammetry. Virginia, USA. 2vol.
- CRÓSTA, A. P. (1993) **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNICAMP, Campinas - SP, Brasil. 170 p.
- DREWNIOK, C. (1994) Multi-spectral edge detection. Some experiments on data from Landsat-TM. **International Journal of Remote Sensing**, **15** (18): 3743 - 3765.
- DRURY, S. A. (1993) **Image Interpretation in Geology**. 2ª ed. Chapman & Hall, U.K. 283 p.
- DUTRA, L. V. & MASCARENHAS, N. D. A. (1984) Some Experiments With Spatial Feature Extraction Methods in Multispectral Classification. **International Journal of Remote Sensing**, **5** (2): 303 - 313.
- FERREIRA, A. C. & RIBEIRO DE ALMEIDA, T. I. (1989) Tectônica Transcorrente e Imagens TM-Landsat Aplicadas à Prospeção de Fluorita e Barita em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geociências**, **19** (2): 207 - 223.
- FAMBRINI, G.L. (1998) **Evolução tectônica e paleogeográfica da Bacia do Camaquã em sua porção centro-sudoeste: uma contribuição através da análise estratigráfica de fácies, proveniência e paleocorrentes**. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP.
- FERREIRA, A. C. & RIBEIRO DE ALMEIDA, T. I. (1989) Tectônica Transcorrente e Imagens TM-Landsat Aplicadas à Prospeção de Fluorita e Barita em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geociências**, **19** (2): 207 - 223.
- FRAGOSO CESAR, A.R.S.; SILVA FILHO, W.F.; FAMBRINI, G.L.; SAYEG, H.S.; MELLO, F.M.; MACHADO, R.; RIBEIRO DE ALMEIDA, T.I. e McREATH, I. e (no prelo) The Proterozoic-Phanerozoic transition in Rio Grande do Sul state, southern Brazil: the Maricá basin, the Bom Jardim magmatic arc and the Camaquã Basin. In: AMOS, A.J.; ROCHA-CAMPOS, A.C. e GAMUNDI, O.L. (Eds.). **The Sedimentary Basins of South America**. Amsterdam, Elsevier.
- GUPTA, R.P. (1991) **Remote Sensing Geology** International Typesetters Inc., Philippines. 356 p.
- GURNEY, C. M. (1980) Threshold selection for line detection algorithms. **I. E. E. E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **GE-18** (2): 204-211.

- HE, D. & WANG, L. (1991) Détection des contours de textures d'images numériques. **International Journal of Remote Sensing**, 12 (3): 651 - 657.
- JENSEN, J. R. (1986) **Introductory digital image processing**. 1^a ed. Prentice-Hall, U.K., pp. 138-151.
- KRISHNAMURTHY, J.; MANAVALAN, P.; SAIVASAN, V. (1992) Application of digital enhancement techniques for groundwater exploration in a hard-rock terrain. **International Journal of Remote Sensing**, 13 (15): 2925 - 2942.
- LEE, J. (1980) Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. **I. E. E. E. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-2** (2): 165 - 168.
- LEITE, C.-E (1998) **Definição do Potencial Hidrogeológico no Contexto cristalino de parte dos Municípios de Crateús e Independência no Estado do Ceará, com Uso de Imagens TM do Landsat 5 e SIG**. 146p. e anexos. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, UFC.).
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (1994) **Remote Sensing and Image Interpretation**. 3^a ed. John Wiley & Sons, Inc., USA. 750 p.
- MARION, A. (1991) **An Introduction to Image Processing**. Chapman And Hall, Great Britain. 315 p.
- MATHER, P. M. (1995) **Computer processing of remotely-sensed images**. 5^a ed. Biddles Ltd., Guildford and King's Lynn, Inglaterra. 352 p.
- MOORE, G. K. & WALTZ, F. A. (1983) Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. A five-step digital convolution procedure extracts edge and line segments or produces directionally enhanced images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 49 (5): 641-647.
- NIÑO, F.; RIVERA, L.; PION, J.-C. (1993) Linear feature enhancing by Hyperbolic-Gaussian filtering. **International Journal of Remote Sensing**, 14 (14): 2617 - 2630.
- OHARA, (1982) Aplicação do programa realce pelas componentes principais na região das Minas do Camaquã - RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1. Brasília, 1982. **Anais**. Brasília, DF. V.1, p.34-37
- PARADELLA, W. R. & DUTRA, L. V. (1980) Filtragens Digitais de Imagens Landsat como Técnica de Auxílio Visual na Fotointerpretação Geológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. Camboriú, 1980. **Anais**. Camboriú, SBG, V. 5, p. 2959 - 2964.

- PAVLIDIS, T. (1980) Algorithms for shape analysis of contours and waveforms. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-2** (4): 310-312.
- PELI, T & LIM, J. S. (1982) Adaptive filtering for image enhancement. **Optical Engineering**, **21** (1): 108 - 112.
- PRADO, I. D. M. do & CRÓSTA, A. P. (1997) Evaluating Geoscan AMSS Mk-II For Gold Exploration in the Fazenda Maria Preta District, Rio Itapicuru Greenstone Belt, Bahia State, Brazil. **Boletim do Instituto de Geociências - USP**, **28**: 63-84.
- RIBEIRO DE ALMEIDA, T.I.; SILVA FILHO, W.F.; FAMBRINI, G.L.; SAYEG, H.S.; McREATH, I.; MACHADO, R. e FRAGOSO CESAR, A.R.S. (1997) Digital processing and geological interpretation of TM-LANDSAT images of the areas east of the Camaquã mine in Rio Grande do Sul State, Southern Brazil. **Boletim do Instituto de Geociências - USP**, **28**: 101-118.
- SILVA FILHO, W. F. da (1997) **A Formação Guaritas na Porção Centro-Sudeste da Bacia do Camaquã - RS**. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP. 120p.
- SCHOWENGERDT, R. A. (1983) **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. Academic Press, Inc., USA. 249 p.
- SHANMUGAN, K. S. & PAUL, C. (1982) A fast edge thinning operator. **I.E.E.E. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-12** (4): 567-569.
- SOUZA FILHO & DINISS (1997) Periodic noise suppression techniques applied to remote sensing images. **Boletim do Instituto de Geociências - USP**, **28**: 23-62
- STRICKLAND, R. N. & ALY, M. Y. (1985) Image sharpness enhancement using adaptive 3 x 3 convolution masks. **Optical Engineering**, **24** (4): 683 - 687.
- WEBSTER, G. M. (Ed.) (1978): **Deconvolution** Soc. of Exploration Geophysicists. Geophysics reprint series, 1. Vol. 1. 475p. Tulsa, OK, USA.
- WESTIN, T. (1990) Filters for removing coherent noise of period 2 in SPOT imagery. **International Journal of Remote Sensing**, **11** (2): 351-357.
- WOOD, L.; NORDMAN, M.; SHAH, N.; CICONE, R.; HOOD, J. (1989) Adaptive filtering on Multiple-Band images using the HSV Transform. In: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 7. Calgary, 1989. **Proceedings**. Michigan, 1989. Environmental Research Institute of Michigan. Vol. II. 891 - 900.

YOUNG, T. Y. & FU, K. (Eds.) (1986) **Handbook of pattern recognition and image processing**. Academic Press Inc., United Kingdom Edition. London. 705 p.

Anexo 1

```

program passaaltas;
var
    saida : text;
    arquivo : string[30];
    i : integer;
    j : integer;
    m : integer;
    ic : integer;
    jc : integer;
    d2 : real;
    a : real;
    e : real;
    ec : real;
    pc : real;
    k : real;
    h : real;
    g : real;
    r : real;
begin
    write('entre com o número de colunas e linhas do filtro:');
    readln (m);
    write('entre com o fator de atenuacao (% da soma a ser adicionada no ponto central)');
    readln (g);
    write('usar a resolucao original da imagem? (1=sim 2=não)');
    readln (r);
    write('entre com o nome do arquivo de saida .ker:');
    readln (arquivo);
    assign (saida, arquivo);
rewrite (saida);
writeln(saida,'Kernel Begin');
writeln(saida,'    Name    = " "');
writeln(saida,'    Description    = "Default Kernel" ');
writeln(saida,'    Type        = Convolution ');
writeln(saida,'    Rows        =', m:6);
writeln(saida,'    Columns     =', m:6);
if r=1 then
writeln(saida,'    OKOnSubsampledData    =No');
writeln(saida,'Array        = {');
    ic:=round(m/2);
    jc:=round(m/2);
ec:=0;
for i:=1 to m do
    for j:=1 to m do
        begin
            d2:=Sqrt(Sqr(i-ic)+Sqr(j-jc));
            if d2<>0 then a:=-1/d2
            else begin
                pc:=(ec*-2)+(ec*-2*g/100);

```

Anexo 1

```
        a:=pc
        end;
    e:=a;
    ec:=ec+e;
    if j<m then
        write(saida,e:10:4)
    else
        writeln(saida,e:10:4)
    end;
ec:=pc-ec;
writeln(saida,'      ');
writeln(saida,'    Scalefactor = 1');
writeln(saida,'Kernel End');
close(saida);
end.
```

Anexo 2

```

program passabaixas;
var
    saida : text;
    arquivo : string[30];
    i : integer;
    j : integer;
    m : integer;
    ic : integer;
    jc : integer;
    d2 : real;
    a : real;
    e : real;
    ec : real;
    pc : real;
    k : real;
    h : real;
    g : real;
    r : real;
begin
    write('entre com o número de colunas e linhas do filtro:');
    readln (m);
    write('entre com o fator de atenuacao (% da soma a ser adicionada no ponto
central)');
    readln (g);
    write('usar a resolucao original da imagem? (1=sim 2=não)');
    readln (r);
    write('entre com o nome do arquivo de saida .ker:');
    readln (arquivo);
    assign (saida, arquivo);
    rewrite (saida);
    writeln(saida, 'Kernel Begin');
    writeln(saida, '      Name      = " "');
    writeln(saida, '      Description      = "Default Kernel" ');
    writeln(saida, '      Type              = Convolution ');
    writeln(saida, '      Rows              =', m:6);
    writeln(saida, '      Columns           =', m:6);
    if r=1 then
        writeln(saida, '      OKOnSubsampledData      =No');
    writeln(saida, 'Array              = {');
    ic:=round(m/2);
    jc:=round(m/2);
    ec:=0;
    for i:=1 to m do
        for j:=1 to m do
            begin
                d2:=Sqrt(Sqr(i-ic)+Sqr(j-jc));
                if d2<>0 then e:=1/d2
                else begin
                    pc:=(ec*2*g/100);

```


Anexo 2

```
                e:=pc
                end;
            ec:=ec+e;
            if j<m then
                write(saida,e:10:4)
            else
                writeln(saida,e:10:4)
            end;
ec:=pc-ec;
writeln(saida,'                ');
writeln(saida,'                Scalefactor = 1');
writeln(saida,'Kernel End');
close(saida);
end.
```