

| | | | |
|--|--------------------------------|--|--|
| 1. Publicação nº <i>INPE-2470-PRE/159</i> | 2. Versão | 3. Data <i>Julho, 1982</i> | 5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita |
| 4. Origem <i>DSE/DIN</i> | Programa <i>INFOR/IMAGE</i> | | |
| 6. Palavras chaves - seleccionadas pelo(s) autor(es) <i>PROCESSAMENTO DE IMAGENS MODELO VISUAL HUMANO</i> <i>REALCE VISUAL ESCALAS DE CROMATICIDADE UNIFORME</i> | | | |
| 7. C.D.U.: <i>621.376.5</i> | | | |
| 8. Título <i>APLICAÇÕES DE PRINCÍPIOS COLORIMÉTRICOS E MODELOS VISUAIS HUMANOS A IMAGENS MULTIESPECTRAIS</i> | | 10. Páginas: <i>32</i> | |
| | | 11. Última página: <i>A.3</i> | |
| | | 12. Revisada por <i>Nelson Mascarenhas</i> <i>Nelson D.A. Mascarenhas</i> | |
| 9. Autoria <i>Gilberto Câmara Neto</i> | | 13. Autorizada por <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i> | |
| Assinatura responsável <i>Guyau</i> | | | |
| 14. Resumo/Notas <i>De uma maneira geral, pode-se considerar que o processamento, ótico ou digital de imagens é a transformação de uma imagem em outra mais adequada aos propósitos do experimentador. Como o observador humano é frequentemente o último elemento da cadeia de processamento, é natural o interesse nas propriedades do sistema visual humano. No caso do INPE, as imagens utilizadas são as multiespectrais em bandas discretas, como no caso dos satélites LANDSAT e SKYLAB. O objetivo deste trabalho é a representação - em falsa cor - das bandas espectrais do LANDSAT da maneira mais adequada ao conhecimento visual humano. Uma escala colorimétrica conveniente é utilizada para modelar a percepção visual humana; métodos de filtragem são também desenvolvidos para realçar a imagem, levando-se em conta as propriedades do olho humano.</i> | | | |
| 15. Observações <i>Este trabalho foi apresentado na 33ª Reunião Anual da SBPC, realizada de 8 a 15 de julho de 1981, em Salvador, BA.</i> | | | |

ABSTRACT

In a general way, one may think about optical of digital image processing as a way of transforming one image into another—the resulting image being more adequate for the researcher's purposes. Since the human observer is often the last element in the processing chain, the concern for human visual system properties arises naturally. In INPE's case, the images in question are multispectral ones, as those obtained from LANDSAT and SKYLAB satellites. The aim of this work is to present - in false color display - the spectral bands of MSS Landsat imageries in a way which is most adequate for human visual recognition. A convenient colorimetric scale is utilized, suitable for modeling human visual perception; filtering methods are also developed in order to enhance the image, taking into account the properties of the human eye.

SUMÁRIO

| | Pág. |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | v |
| 1. <u>INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| 2. <u>O SISTEMA VISUAL HUMANO</u> | 1 |
| 2.1 - Meio ótico | 2 |
| 2.2 - Córtex visual | 2 |
| 2.3 - Modelo matemático | 4 |
| 3. <u>SISTEMAS COLORIMÉTRICOS</u> | 6 |
| 3.1 - Sistema CIE | 6 |
| 3.2 - Deficiências | 7 |
| 3.3 - Sistema Lab | 8 |
| 3.4 - Sistema Frei | 9 |
| 3.5 - Sistema Faugeras | 11 |
| 3.6 - Comparações entre modelos | 11 |
| 4. <u>MAPEAMENTO DE DADOS MULTIESPECTRAIS PARA ESPAÇO DE CORES</u> | 13 |
| 4.1 - Representação visual | 13 |
| 4.2 - Mapeamento proposto | 14 |
| 5. <u>PROCESSAMENTO NO ESPAÇO PERCEPTUAL</u> | 16 |
| 5.1 - Equalização de variâncias | 16 |
| 5.2 - Filtragem passa-altas espacial | 17 |
| 5.3 - Filtragem para retirada de ruído | 17 |
| 5.4 - Mapeamento para novos canais | 17 |
| 6. <u>COMENTÁRIOS FINAIS</u> | 19 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 21 |
| APÊNDICE A - PROJETO DO FILTRO DE WIENER PARA RETIRADA DE BRANCO | |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 1 - Diagrama de blocos para o modelo biológico da visão humana ... | 3 |
| 2 - Diagrama de blocos do modelo matemático (simplificado) da visão humana | 5 |
| 3 - Funções de iluminação padrão do CIE, que definem o iluminante padrão | 7 |
| 4 - Diagrama de cromaticidade do CIE (1931), que mostra regiões de diferença mínima perceptível (Elipses de MacAdam) aumentadas 10 vezes | 8 |
| 5 - Representação usual de imagens LANDSAT | 14 |
| 6 - Mapeamento de dados multiespectrais para o espaço de cores e processamento posterior | 15 |

1. INTRODUÇÃO

O aparecimento de satélites de sensoriamento remoto criou novas perspectivas no campo de processamento de imagens; desenvolveram-se aplicações – entre outras – nos âmbitos de classificação de atributos, correção de efeitos da atmosfera, realçamento de imagens e retirada de ruído. Apenas recentemente, porém, tem-se procurado transformar as imagens multiespectrais de uma maneira conveniente para a fotointerpretação; transformações deste tipo utilizam as propriedades conhecidas do sistema visual humano.

A idéia deste trabalho é determinar o mapeamento mais eficiente para imagens MSS do satélite LANDSAT, com vistas ao reconhecimento visual da imagem resultante. Os canais multiespectrais originais são inicialmente transformados para a percepção humana num espaço colorimétrico conveniente; a seguir, realizam-se filtragens e reescalamentos neste espaço, procurando-se realçar a imagem obtida; finalmente, converte-se a imagem na representação que utiliza 3 canhões de cor (R,G,B) presentes num Sistema Interpretador de Imagens do tipo Image-100, existente no INPE; ou em alguma outra representação desejada.

Este relatório divide-se em cinco seções: na Seção 2, será apresentado um modelo do sistema visual humano, utilizado para a análise em questão; na Seção 3, discutem-se os sistemas colorimétricos em geral e, em particular, o sistema $L^*a^*b^*$ – considerado apropriado para a representação do sistema visual humano; a Seção 4 apresenta uma proposta de mapeamento, desde os dados multiespectrais até o espaço de cores conveniente; na Seção 5, diversos métodos de processamento no espaço de cores obtido (denominado "espaço perceptual") são discutidas; comentários finais são apresentados na Seção 6.

2. O SISTEMA VISUAL HUMANO

O advento da tecnologia de processamento de imagens por computador tornou especialmente relevante o modelamento do sistema visual humano. Tais modelos podem tornar-se ferramentas bastante úteis em

aplicações como compressão e representação de imagens. Com vistas a um posterior desenvolvimento, apresenta-se aqui um modelo matemático, bastante utilizado na literatura (Hall, 1978; 1979). O modelo se refere à percepção de imagens com *boa iluminação, em cores*; os aspectos temporais não serão levados em conta.

2.1 - MEIO ÓTICO

O modelo biológico correspondente a essas hipóteses é mostrado em diagrama de blocos na Figura 1. O meio ótico é representado por um bloco individual, e é seguido de três blocos que denotam os três tipos de cores. (Como se modela a visão a cores com boa iluminação, os bastonetes não são considerados.) Depois que o fotopigmento de um cone absorve a luz, várias mudanças químicas ocorrem, conduzindo a uma atividade elétrica nas fibras dos nervos óticos. Neste ponto, os sinais dos nervos são *funções não-lineares* dos estímulos visuais. O lugar exato onde ocorre a não-linearidade da retina não é conhecido; contudo, existem evidências de que isto se dá depois dos receptores. O modelo biológico da retina é completado com blocos de interação nervosa, que representam a rica interconexão existente no local.

2.2 - CÓRTEX VISUAL

Os blocos do córtex visual representam uma organização com quatro estruturas de *células oponentes* e duas de *células não-opponentes* (Hurvich e Jameson, 1974; De Valois et alii, 1966). O último bloco do diagrama representa as células simples e complexas cujas características foram estudadas por Hubel e Wiesel (Hall, 1978).

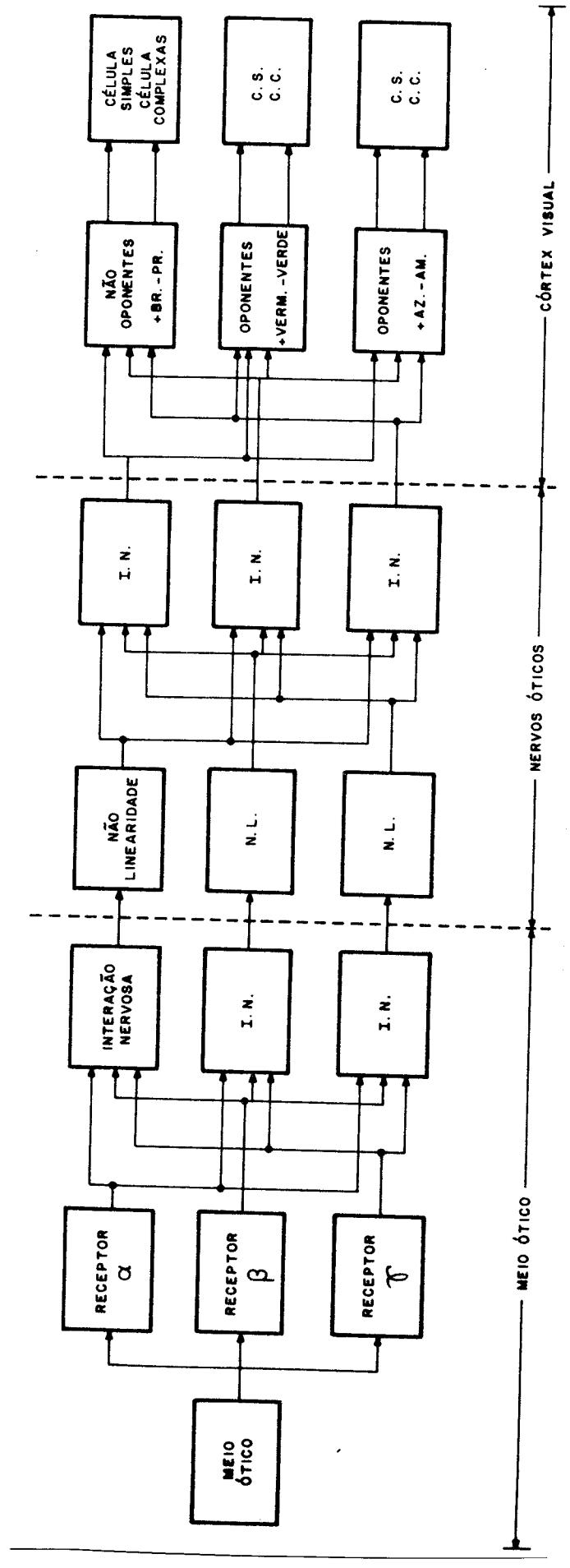


Fig. 1 - Diagrama de blocos para o modelo biológico da visão humana.

2.3 - MODELO MATEMÁTICO

O homólogo matemático da Figura 1 é mostrado na Figura 2. O meio ótico é representado por filtro passa-baixas espacial, que modela as características do globo ocular. As respostas dos cones estão designadas pelos filtros *passa-faixa espectrais*. Os efeitos a serem explicados pelo filtro passa-altas são de outra natureza: nosso sentido visual tende a realçar as bordas das imagens; além disso, duas cores idênticas tendem a parecer diferentes, se vistas sobre o fundo de cores distintas.

A transformação T e a não-linearidade procuram levar em conta as interações que ocorrem quando da transmissão do sinal através do nervo ótico. Como é sabido, este contém cerca de 800.000 fibras; por causa do grande número de receptores na retina (cerca de 100.000.000), existe uma rica interconexão entre os cones e bastonetes e as fibras nervosas. Além da não-linearidade, que possibilita ao sistema visual humano a recepção de uma vasta gama de luminâncias (da ordem de 10^{10}), a presença de filtros passa-altas indica a atividade de mecanismos de inibição e excitação no nervo ótico (Cornsweet, 1970).

A saída dos filtros passa-altas representa a informação recebida no córtex cerebral. Nesse modelo, considera-se a existência de um canal com informação de luminância ("*brilho*") e de dois outros canais que contêm a informação de cor; os dois últimos denominam-se geralmente "*amarelo-azulado*" e "*verde-avermelhado*".

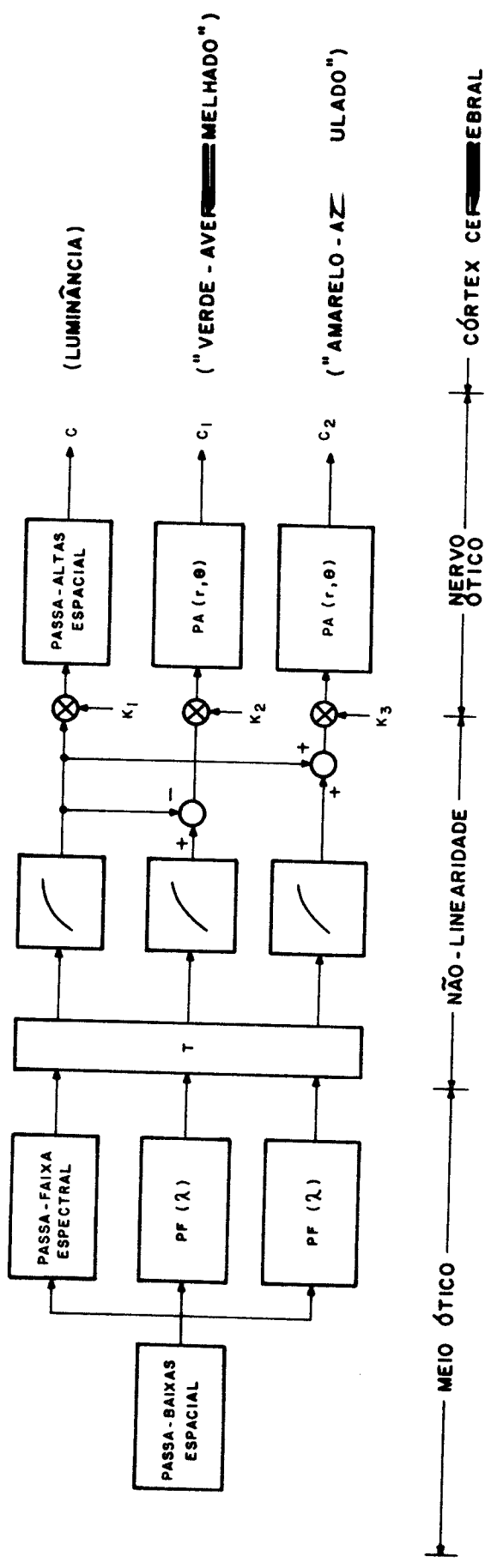


Fig. 2 - Diagrama de blocos do modelo matemático (simplificado) da visão humana.

3. SISTEMAS COLORIMÉTRICOS

3.1 - SISTEMA CIE

O método padrão de especificar cor é o chamado *sistema CIE* (Commision Internationale de l'Eclairage - Comissão Internacional de Iluminação), que foi originalmente desenvolvido em 1931.

Nesta formulação, considera-se que a cor é o resultado da interação entre *três componentes* X,Y,Z. Foram escolhidas três funções-padrão $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (Figura 3), para a determinação dos componentes para uma determinada cor C_1 . Se a cor C_1 tiver composição espectral da da por uma função $P(\lambda)$, as coordenadas X,Y,Z serão determinadas a par tir de

$$X = K_{\max} \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = K_{\max} \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = K_{\max} \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

onde K_{\max} é a máxima luminosidade possível na situação de "casamento" entre as coordenadas X,Y,Z e a cor C_1 .

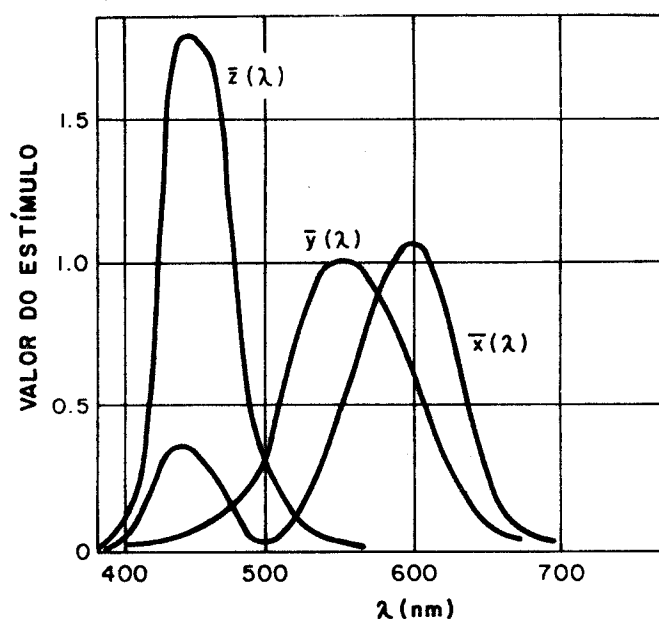


Fig. 3 - Funções de iluminação padrão do CIE, que definem o iluminante padrão.

A existência de três primárias distintas é uma exigência de qualquer sistema colorimétrico, pois uma dada cor pode sempre ser representada por uma tripla (x,y,z) no espaço tridimensional. O método padrão de representar a informação cromática do padrão (x,y,z) é obtido tomando-se as coordenadas normalizadas como segue:

$$x = \frac{x}{x + y + z} ; y = \frac{y}{x + y + z} ; z = \frac{z}{x + y + z} \quad (4)$$

O plano unitário no qual $x + y + z = 1$ é usualmente denominado *diagrama de cromaticidade do CIE (1931)*; nele, quantidades normalizadas de todas as cores reais são representadas por pontos (x, y) na região fechada (Figura 4).

3.2 - DEFICIÊNCIAS

O sistema do CIE de 1931, embora bastante utilizado, apresenta uma deficiência fundamental. No diagrama de CIE, cores separadas

por uma diferença numérica igual não são igualmente distintas em aparência. Isto é ilustrado na Figura 4, na qual elipses de diferenças minimamente perceptíveis (aumentadas 10 vezes) são mostradas no diagrama x-y do CIE. Para resolver este problema, tentou-se desenvolver escalas de cromaticidade uniforme (onde as distâncias lineares corresponderem com maior fidelidade às diferenças perceptíveis).

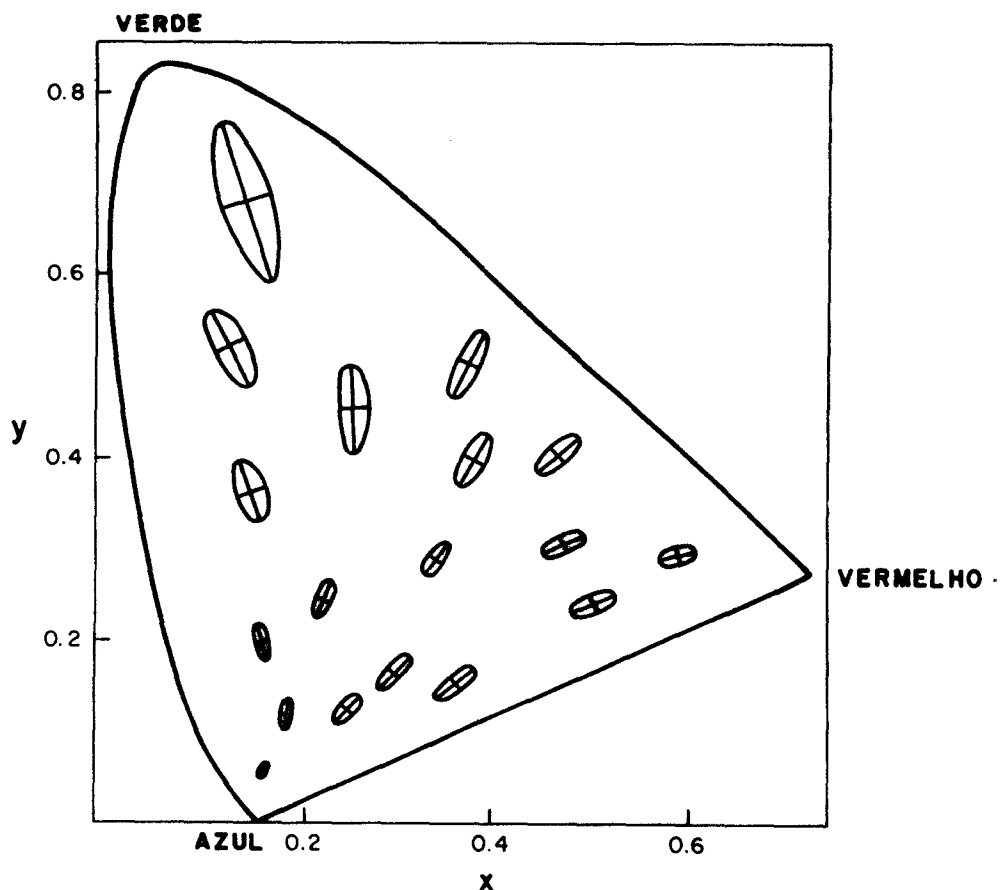


Fig. 4 - Diagrama de cromaticidade do CIE (1931), que mostra regiões de diferença mínima perceptível (Elipses de MacAdam) aumentadas 10 vezes.

FONTE: Hall (1978).

3.3 - SISTEMA LAB

O sistema LAB — proposto por Adams e Nickesson — procura mapear as áreas de igual percepção no diagrama do CIE para círculos de igual raio. Em termos de RGB, o sistema é definido como

$$\begin{aligned}L &= 25.29 G^{1/3} - 18.38 \\a &= 106.0 (R^{1/3} - G^{1/3}) \\b &= 42.34 (G^{1/3} - B^{1/3})\end{aligned}\tag{5}$$

onde

$$R = 1.1084X + 0.0852Y - 0.1454Z$$

$$G = -0.001X + 1.0005Y + 0.0004Z$$

$$B = -0.0062X + 0.0394Y + 0.8192Z$$

(apud Judd e Wyszecki, 1975). Este sistema fornece um conjunto de coordenadas que estão em concordância com as coordenadas perceptuais do espaço de Munsell: as três componentes L, a, b aproximam as coordenadas cromáticas do espaço perceptual no sistema visual humano (SVH) ("luminância", "verde-avermelhado", "azul-amarelado"). Além disso, a formulação contém uma não-linearidade, e — em particular — aquela que se propõe ser a não-linearidade "correta" para o SVH (Sistema Visual Humano); deste modo, o sistema LAB é apoiado por considerações fisiológicas e psicofísicas.

3.4 - SISTEMA DE FREI

Em seu modelo, Frei (1973) desenvolveu um modelo de visão com as seguintes suposições:

- 1) a retina contém três tipos de fotoreceptores cujas absorções de energia espectral são linearmente independentes; a informação percebida na retina pode ser modelada por três variáveis — t_1 , t_2 , t_3 — que descrevem o espaço de tri-estímulos, representando a resposta espectral das cores;

- 2) A energia transmitida através do *nervo ótico* é uma função a proximadamente *logarítmica* da energia luminosa absorvida; o espaço que descreve a transmissão é descrito por três variáveis - t_1^* , t_2^* , t_3^* (onde $t_i^* = \log t_i$), que indicam a conversão para sinais "neurais".
- 3) As interações espaciais do *nervo ótico* são representadas por filtros lineares espaciais.
- 4) O "*espaço perceptual*" é descrito por uma coordenada de luminância ℓ^* e duas coordenadas de crominância, C_1^* e C_2^* .

O modelo desenvolvido por Frei (1973) para aplicações primordiais em processamento de imagens utiliza uma *não-linearidade* do tipo *logarítmica*: sua idéia é *estabelecer critérios de erro* mais relevantes para o observador humano, no caso de codificação e realçamento de imagens em cores. Define-se o sistema com três coordenadas, ℓ^* , C_1^* , C_2^* , dadas por

$$\begin{bmatrix} \ell^* \\ C_1^* \\ C_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21.5 & 0.0 & 0.0 \\ -41.0 & 41.0 & 0.0 \\ -6.27 & 0 & 6.27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1^* \\ t_2^* \\ t_3^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde t_1^* , t_2^* , t_3^* , denotam os *logarítmicos* das respostas *dos cones reti*na, que podem ser expressos em função do sistema RGB como segue:

$$\begin{bmatrix} t_1^* \\ t_2^* \\ t_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .299 & .587 & .114 \\ .127 & .724 & .175 \\ 0.0 & .066 & 1.177 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (7)$$

No sistema de Frei, a percepção da cromaticidade é função das *razões* das energias absorvidas nos diferentes tipos de receptores; tal sistema vem sendo utilizado, com sucesso, em aplicações de *codificação de imagem* (Hall, 1978).

3.5 - SISTEMAS DE FAUGERAS

Um outro modelo baseado no SVH é o desenvolvido por Faugeras (1979): a partir de uma matriz que representa o estágio de absorção dos cones - definida como:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} .363 & .610 & .026 \\ .125 & .814 & .062 \\ .001 & .060 & .939 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (8)$$

obtêm-se três *coordenadas perceptuais* (similares às do modelo de Frei), dadas por

$$\begin{bmatrix} A \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 13.83 & 8.34 & .429 \\ 64. & -64. & 0.0 \\ 10 & 0.0 & -10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_n F_1 \\ \lambda_n F_2 \\ \lambda_n F_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

A diferença mais importante entre o modelo de Faugeras e o de Frei é com respeito à relação entre as *componentes de "luminância"* - A e λ^* , respectivamente. A componente λ^* deriva seu caráter de luminosidade de resposta dos cones "verdes"; na componente A, as constantes que multiplicam cada função logarítmica dão a mistura correta para uma aproximação da luminância.

3.6 - COMPARAÇÕES ENTRE MODELOS

No caso de imagens comuns (não-multiespectrais), Hall (1978) analisou o *conteúdo de energia* das coordenadas dos diversos modelos colorimétricos apresentados acima; como referência, usou-se também a *transformação de Karhunen-loève* - que resulta em máximo empacotamento de energia e descorrelaciona os planos do espaço de coordenadas da cor. Os resultados são evidenciados nas Tabelas 1 e 2.

TABELA 1

EMPACOTAMENTO DE ENERGIA

| Coordena das Sistema | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| RGB | 48,26% | 28,76% | 22,98% |
| Lab | 85,38% | 9,46% | 5,17% |
| Faugeras | 94,00% | 5,33% | 0,67% |
| Karhunen-Loève | 94,00% | 5,10% | 0,90% |
| Frei | 98,42% | 1,33% | 0,19% |

TABELA 2

CORRELAÇÃO ENTRE COORDENADAS

| Coordena das Sistema | 1 com 2 | 1 com 3 | 2 com 3 |
|----------------------------|---------|---------|---------|
| Karhunen-Loève | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| RGB | 0,771 | 0,682 | 0,913 |
| Faugeras | - 0,480 | - 0,394 | 0,812 |
| Frei | 0,414 | 0,338 | 0,818 |
| Lab | - 0,353 | - 0,270 | 0,646 |

No caso de compactação de energia, tanto o sistema de Faugeras como o de Frei apresentam aproximações satisfatórias para a compactação de energia, de maneira similar à representada pela transformação de Karhunen-Loève. Quanto à correlação entre coordenadas, é difícil argumentar sobre o sistema que "melhor" simula a transformada de KL.

4. MAPEAMENTO DE DADOS MULTIESPECTRAIS PARA O ESPAÇO DE CORES

Considera-se aqui a natureza dos dados multiespectrais e seu mapeamento para um espaço de cores convenientes. Um problema inicial é evidente: os dados MSS do LANDSAT *não tem cor*; na realidade tais dados medem *reflectâncias* em faixa *discreta* do espectro - para algumas das quais nem sequer a olho humano possui resposta. (veja Tabela 3).

TABELA 3

COMPOSIÇÃO DAS BANDAS LANDSAT

| BANDA | FAIXA DO ESPECTRO MEDIDA | CARACTERÍSTICA ESPECTRAL | COR NORMALMENTE UTILIZADA NA REPRESENTAÇÃO |
|-------|--------------------------|------------------------------|--|
| 4 | 0,5 - 0,6 m | verde | azul |
| 5 | 0,6 - 0,7 m | vermelho | verde |
| 6 | 0,7 - 0,8 m | infravermelho fotográfico | vermelho |
| 7 | 0,8 - 1,1 m | infravermelho fotográfico | vermelho |

4.1 REPRESENTAÇÃO USUAL

A representação usual dos dados do LANDSAT é feita associando-se a 3 das quatro bandas multiespectrais os 3 canhões coloridos (R, G, B) do Analisador Multiespectrais (Figura 5). Torna-se evidente que tal representação carece de eficiência, seja considerando-se a interpretação visual da informação, seja considerando-se o processamento dessa informação em função do sistema visual humano.

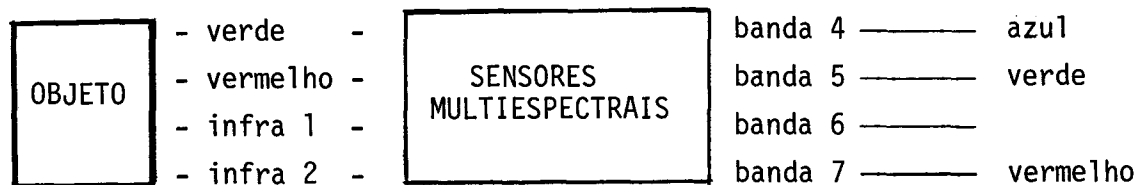


Fig. 5 - Representação usual de imagens LANDSAT

4.2 - MAPEAMENTO PROPOSTO

Um mapeamento eficiente para o *espaço perceptual* (assim chamado porque representava o espaço cujas coordenadas são mais relevantes para o interpretador humano) deverá satisfazer a algumas condições:

1. A *transformação não-linear* deverá aproximar a não-linearidade que existe no sistema visual humano (*raiz cúbica* ou *logarítmica*)
2. As novas dimensões modelam corretamente as *três componentes* da visão humana em cores, a saber: "*brilho*", "*verde-avermelhado*", "*azul-amarelado*", e serão obtidos através de duas transformações (não-linear e linear) da imagem original. (Taylor, 1974).
3. No *espaço perceptual*, serão realizadas *filtragens espaciais* com o objetivo de realçar a imagem. Em aplicações de codificação, poder-se-iam utilizar filtros com o objetivo de reduzir a largura de faixa de imagem sem comprometer sua qualidade.
4. O *processamento final* deverá mapear os dados do "*espaço perceptual*" para os 3 canhões (R,G,B) do Analisador Multiespectral: outra opção será o *mapeamento inverso*, retornando às 4 componentes de imagem original.

O *processo global* correspondente a essas observações é ilustrado na Figura 6 a seguir.

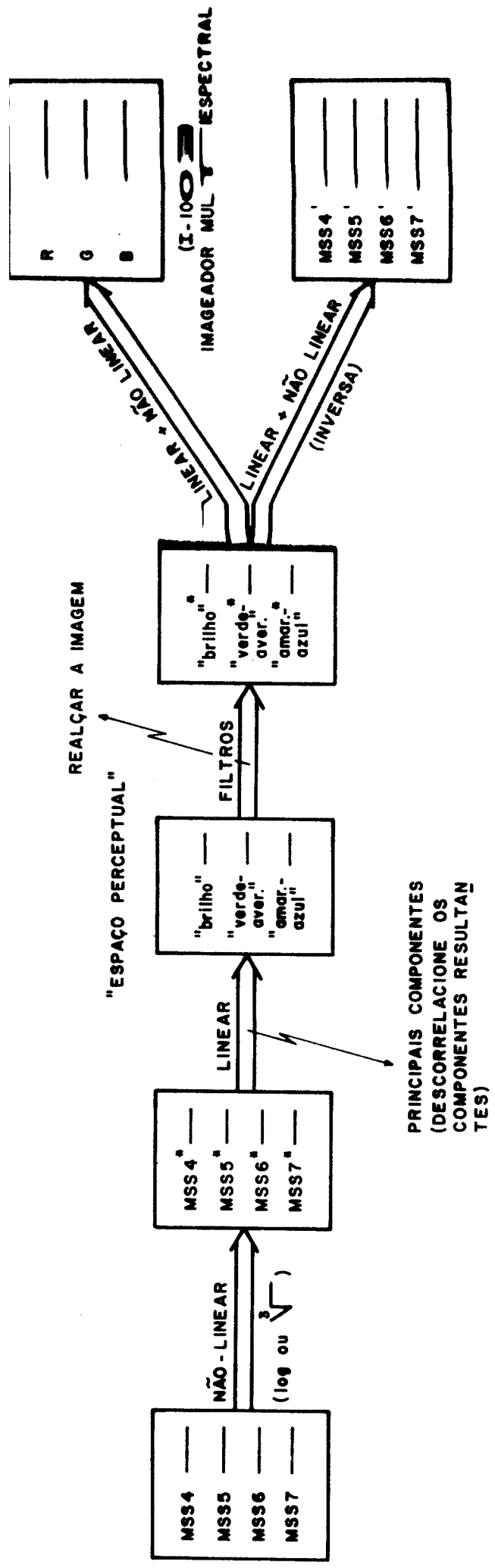


Fig.6 - Mapeamento de dados multiespectrais para o espaço de cores e processamento posterior.

O passo seguinte reporta-se à *escolha* das transformações (linear e não linear): a idéia de obter - a partir dos 4 canais MSS originais - 3 componentes distintos que possam definir um espaço de cores sugere uso de transformação das *principais componentes*, já estudadas pelo autor em outro trabalho (Câmara et alii 1980) e encontrada na literatura em trabalhos com objetivo semelhante (Taylor, 1974; Kaneko, 1978; Juday, 1979). Além disso, a utilização dos sistemas *colorimétricos* que pretendem simular as características perceptuais do SVH (tais como Lab, Faucher ou Freil) indica que se deve empregar uma transformação do tipo *raiz cúbica* ($\sqrt[3]{}$) ou *logarítmica* (\ln) como *representativa* de não-linearidade inerente à visão.

5. PROCESSAMENTO NO ESPAÇO PERCEPTUAL

Uma vez utilizadas as transformações (não linear e principais componentes), obtém-se o "*espaço perceptual*". Neste espaço, *processamentos* adicionais são implementados, com o objetivo de realçar a *aparência visual* da imagem final.

5.1 - EQUALIZAÇÃO DE VARIÂNCIAS

Um procedimento útil no caso da transformação das componentes principais é a *equalização de variâncias*: aplica-se a cada componente principal em realce radiométrico, de modo que a imagem ocupe o intervalo ($\bar{m} - d, \bar{m} + d$); esse intervalo corresponde (aproximadamente) a γ desvios padrões em torno da média \bar{m} .

Deste modo, a matriz de covariância das componentes principais - após a equalização de variâncias - pode ser representada por:

$$K = \begin{bmatrix} \sigma^2 & & & \\ & \sigma^2 & & \\ & & \sigma^2 & \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix} = \sigma^2 I \quad (\text{diagonal}) \quad (10)$$

onde $\sigma^2 = d^2/\gamma^2$ (nova variância).

5.2 - FILTRAGEM PASSA-ALTAS ESPACIAL

A *filtragem passa-altas* tem por objetivo realçar o conteúdo de alta frequência no espaço perceptual, seguindo idéias originalmente apresentadas por Stockham (1972) e Faugeras (1979).

Para filtragem passa-altas espacial, utilizar-se-á o filtro proposto por Stockham (1972):

$$f(R) = \frac{742}{661 + R^2} - \frac{2.463}{2.459 + R^2} \quad R \leq 6 \text{ ciclos/grau} \quad (11)$$
$$f(R) = 1 \quad R > 6 \text{ ciclos/grau}$$

A filtragem passa-altas espacial será aplicada apenas às componentes principais de maior variância, pois estas apresentam alta relação sinal/ruído.

5.3 - FILTRAGEM PARA RETIRADA DE RUÍDO

No caso das duas componentes principais de menor variância, a presença de uma *baixa relação sinal/ruído* torna inviável a utilização de filtragem com ênfase nas altas frequências. Assim, torna-se válido utilizar uma filtragem do tipo passa-baixas para a retirada do ruído. O projeto do filtro é discutido no Apêndice A.

5.4 - MAPEAMENTO PARA NOVOS CANAIS

A fase final do processamento é o *mapeamento* dos canais do "espaço perceptual" para os canais finais. Aqui se apresentam duas possibilidades:

- a) O espaço final são os três canhões (R, G, B) de um Analisador Multiespectral do tipo I-100. Neste caso, a utilização de um sistema colorimétrico (como o Lab) deve ser acompanhada de uma conveniente alteração em seus parâmetros, pois o Analisador Multiespectral possui um conjunto limitado e discreto de níveis de cinza (normalmente 250); deve-se, então, tomar precauções para utilizar convenientemente este conjunto de níveis discretos. No caso do Sistema Lab, uma conversão possível será feita tomando-se por analogia a Equação (3.5):

$$\begin{aligned} G &= \left(\frac{L^* + 119.8}{49.17} \right)^3 - 50 \\ R &= \left(\frac{a^* - 128}{64} - G^{1/3} \right)^3 - 50 \\ B &= \left(G^{1/3} - \frac{b^* - 128}{64} \right)^3 - 50 \end{aligned} \quad (12)$$

Na equação, L^* , a^* , b^* representam as três componentes principais, que possuem média 128 e variância $\frac{64^2}{3^2} = 455.11$

- b) O espaço final é formado retornando-se aos canais multiespectrais originais. Neste caso, é suficiente utilizar a transportada da matriz dos autovetores A (utilizada na transformação dos componentes principais), pois, como se sabe,

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T \quad (13)$$

Faz-se assim, a transformação não-linear inversa. Este mapeamento tem especial relevância se se deseja preservar a informação espectral específica de cada canal, realçando suas características espaciais.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

O objetivo deste trabalho é processar as imagens LANDSAT no contexto do sistema visual humano. As aplicações do trabalho são variadas, tanto no aspecto de realçamento visual, como no âmbito de codificação. No caso de codificação, um teste a ser realizado é o da codificação de imagens LANDSAT no espaço perceptual; a idéia é reduzir a largura em faixa da imagem, sem comprometer a qualidade visual da informação.

Como se trata de um trabalho de natureza eminentemente empírica, faz-se mister a experiência com vários tipos de modelos colorimétricos para determinar aquele que melhor se adapta ao processamento de imagens LANDSAT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREWS, H.C.; HUNT, B.R. *Digital image restoration*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1977.
- CÂMARA, G.; ARAÚJO, E.; MASCARENHAS, N.; SOUZA, R. *Realce visual de imagens de recursos naturais*. São José dos Campos, INPE, 1980. (INPE-1952-RPE/267).
- CORNSWEET, T.N. *Visual perception*. New York, Academic, 1970.
- FAUGERAS, O.D. Digital color image processing within the framework of a human visual model. *IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 27 (4): 380 - 93, Aug. 1979.
- FREI, W. Modeling color vision for psychovisual image processing. In: *Semiannual technical report*, Image Processing Institute, University of Southern California. Los Angeles, USC, 1973. (USCEE Report 459).
- HALL, C. *Digital color image compression on a perceptual space*. PhD Thesis. Los Angeles, University of Southern California, Image Processing Institute, 1978.
- HALL, E. *Computer image processing and recognition*, New York, Academic, 1979.
- HURVICH, L.M.; JAMESON, D. Opponent process as a model of neural organization. *American psychologist*, 29(2): 88-102, Feb. 1974.
- JUDAY, R. *Colorimetric principles as applied to multichannel imagery*. Springfield, VA., NTIS, July 1979. (NASA IM-58215).
- JUDD, D.; WYSZECKI, G. *Color in business, science and industry*. 3ª ed. New York, John Wiley, 1975.
- KANEKO, T. Color composite pictures from principal axis components of MSS data. *IBM Journal of Research and Development*, 22 (4): 386-92. July 1978.
- PRATT, W.K. *Digital image processing*. New York, John Wiley, 1978.
- STOCKHAM, I. Image processing in the context of a visual model. *Proceedings of the IEEE*, 60 (7): 828-41, July 1972.

- TAYLOR, M.M. Principal components colour display of ERTS Imagery.
In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 2., Guelph, Canada, 1974.
Proceedings. Ottawa, Canadian Remote Sensing Society, 1974, v.1, p.
295 - 313.
- DE VALOIS, R.; ABRAMOV, J.; JACOBS, G. Analysis of response patterns
of LGN cells. *Journal Optical Society of America*, 56 (7): 966-977,
Aug. 1966.

APÊNDICE A

PROJETO DO FILTRO DE WIENER PARA RETIRADA DE RUÍDO BRANCO

Dada uma imagem corrompida por ruído, expressa em forma vectorial por

$$\mathbf{g} = \mathbf{f} + \mathbf{n}, \quad (\text{A.1})$$

onde \mathbf{f} é a imagem original e \mathbf{n} , o ruído (suposto branco), a estimativa de erro médio quadrático mínimo - derivada originalmente por Wiener - pode ser expressa por

$$\hat{\mathbf{F}}(w_x, w_y) = \frac{1}{1 + \frac{\mathbf{S}_n(w_x, w_y)}{\mathbf{S}_f(w_x, w_y)}} \cdot \mathbf{G}(w_x, w_y) \quad (\text{A.2})$$

onde $\hat{\mathbf{F}}$, \mathbf{G} são as transformadas de Fourier da estimativa e da imagem corrompida por ruído; e \mathbf{S}_n e \mathbf{S}_f são os espectros de potência do ruído e imagem original, respectivamente. (Andrews e Hunt, 1977).

A.1 - ESPECTRO DE POTÊNCIA DA IMAGEM

Para a determinação do espectro de potência da imagem será necessário especificar a média e a covariância da imagem

Para a determinação da covariância, supõe-se que a imagem é caracterizada por um processo de Markov separável em que a correlação entre "pixels" adjacentes é igual a ρ . A matriz de covariância das linhas pode ser expressa como

$$[C_L] \sigma_L^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho & \rho^2 & \dots & \rho^{N-1} \\ \rho & \rho^2 & \rho^3 & \dots & \rho^N \\ \rho^2 & \rho^3 & \rho^4 & \dots & \rho^{N+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho^{N-1} & \rho^N & \rho^{N+1} & \dots & \rho^{2N-1} \\ \rho^N & \rho^{N+1} & \rho^{N+2} & \dots & \rho^{2N} \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

A matriz de covariância total \mathbf{C} é então obtida, através do produto de Kronecker, das matrizes \mathbf{C}_L e \mathbf{C}_C (linha e coluna, respectivamente).

No caso da função densidade de propabilidade, utilizar-se-á a hipótese de que os dados são Gaussianos, definidos por

$$p(x, \dots, x_n) = (2\pi)^{-n/2} [\mathbf{C}]^{-1} \exp \left\{ -1/2 (\bar{x} - \bar{\mu}) [\mathbf{C}]^{-1} (\bar{x} - \bar{\mu})^t \right\} \quad (A.4)$$

No caso em estudo, procura-se o espectro de potência de uma imagem após uma transformação não-linear - e não o espectro da imagem original - pois a filtragem será realizada no "espaço perceptual", para suprimir o ruído em uma das principais componentes (seção 5).

Quando a imagem é passada através de uma não-linearidade (do tipo logarítmico), e supondo-se que ela é isotrópica ($\sigma_L^2 = \sigma_C^2 = \sigma^2$), pode-se mostrar que o espectro de potência da imagem será dado por (Hall, 1978).

$$Sf^*(w) = \frac{2\sigma^2 \alpha}{\alpha^2 + w^2} + 2\pi \mu^2 \delta(w) \quad (A.5)$$

onde $\underline{p} = \underline{e}^{-\alpha}$ é o parâmetro do processo de Markov que descreve a correlação entre "pixels" adjacentes; μ e α^2 são a média e a variância da imagem após uma transformação do tipo logarítmico.

A.2 - ESPECTRO DE POTÊNCIA DO RUÍDO

No caso do ruído, supõe-se um processo de degradação do tipo aditivo, no "espaço perceptual" (ou multiplicativo nos canais originais) independente do sinal.

Deste modo, o problema se torna uma filtragem de Wiener clássica.