

Realce de Imagens Coloridas através da Equalização de Histogramas 2D

ANDRÉ MELO¹ DAVID MENOTI (ORIENTADOR)¹² EDERSON SGARBI (ORIENTADOR)²³
JACQUES FACON (ORIENTADOR)² ARNALDO DE ALBUQUERQUE ARAÚJO (ORIENTADOR)¹

¹ UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

DCC - Departamento de Ciência da Computação

Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha - Belo Horizonte, MG, CEP 31270-010, Brasil

{andrep,menoti,arnaldo}@dcc.ufmg.br

² PUCPR - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

PPGIA - Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada

Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho - Curitiba, PR, CEP 80215-901, Brasil

{menoti,facon,sgarbi}@ppgia.pucpr.br

³ FFALM - Faculdade Luiz Meneguel, Universidade Estadual do Paraná

DI - Departamento de Informática

Rod. BR 369 Km 54 - Bandeirantes, PR, CEP 86360-000, Brasil

sgarbi@ffalm.br

Abstract. Este artigo introduz um método de realce de imagens coloridas usando equalização bidimensional. Experimentos comparativos foram realizados através de técnicas unidimensionais e tridimensionais. Resultados qualitativos e quantitativos são apresentados, além da análise da complexidade de tempo e espaço a fim de mostrar o desempenho do método proposto. As áreas de aplicação são mostradas na discussão sobre os resultados.

1 Introdução

O histograma de uma imagem em nível de cinza apresenta a frequência relativa de ocorrência dos tons na imagem. A equalização de histograma (EH) foi proposta como uma técnica eficiente para realçar as imagens em tons de cinza [Woods and Gonzalez, 1981]. Esta técnica modifica uma imagem de modo que o histograma da imagem resultante seja uniforme (plano), ou seja, um mesmo (i.e., aproximadamente, é claro que isso é improvável praticamente visto a natureza discreta de um histograma) número de *pixels* para todos os níveis de cinza. Variações destas técnicas, conhecidas como modificação de histograma e especificação de histograma, que resultam em um histograma tendo a forma desejada, também foram propostas [Jain, 1989], [Niblack, 1986]. A extensão de EHs para imagens coloridas não é trivial, devido à natureza multidimensional do histograma em imagens coloridas. Por esta razão, vários métodos foram propostos para EH de imagens coloridas que dilatam o histograma ao longo dos eixos da componente principal do histograma original [Soha and Schwartz, 1978] ou dilata repetidamente os três histogramas dimensionais. Em 1992, um algoritmo que considera a dependência entre os canais *RGB* foi proposto [Trahanias and Venetsapopoulos, 1992]. Outros métodos de realce foram propostos. Esses operam principalmente no componente de brilho (claridade) da imagem original [Strickland et al., 1987], [Bockstein, 1986]. Outro método de EH em imagens coloridas foi proposto em

[Pichon et al., 2003]. Nesse método, é apresentado uma extensão de EHs unidimensionais para imagens coloridas, que é aplicado à visualização científica de pseudo-coloração.

Este artigo apresenta um novo método para equalização de três histogramas 2D baseado no bem conhecido sistema de cores *RGB* (*R* - *Red* - Vermelho, *G* - *Green* - Verde e *B* - *Blue* - Azul) [Woods and Gonzalez, 1981]. Estes três histogramas bidimensionais, *RG*, *RB* e *GB*, são resultantes das combinações dois a dois dos três canais básicos *R*, *G* e *B*. Trata-se de um método de especificação de histograma, em que se obtém histogramas uniformes 2D. A motivação para o desenvolvimento dessa metodologia, está diretamente relacionada com a complexidade computacional envolvida. Os métodos de equalização EHs 3D têm complexidade de tempo e espaço cúbica ($O(L^3)$ - onde L é o número de quantizações, no caso geral, 256 valores), enquanto que, os métodos de EHs 1D tem complexidade de tempo e espaço linear ($O(L)$). Portanto, é de se esperar que o método proposto aqui tenha ordem de complexidade de tempo e espaço quadrática ($O(L^2)$). Logo, um método que seja mais eficiente que os de EHs 3D e mais eficazes que os 1D será desenvolvido. Por outro lado, deseja-se avaliar a qualidade dos resultados obtidos pela nossa abordagem em relação aos métodos de EHs 3D.

Este artigo é organizado da seguinte forma. Na Seção 2, são apresentadas técnicas existentes de equalização de histogramas, mais especificamente equalização de histogramas unidimensionais e tridimensionais. Na Seção 3, um

novos métodos de equalização é proposto e detalhado. Este é avaliado e comparado experimentalmente com outros algoritmos na Seção 4. Uma discussão sobre os resultados é realizada na Seção 5. Na Seção 6, conclusões são apontadas sobre o trabalho realizado.

2 Equalização do Histograma

O processo de equalização de histograma consiste em gerar um histograma uniforme para a imagem de saída a partir do histograma original da imagem de entrada. Nesta seção, são apresentadas técnicas de equalização de histogramas. A primeira (Seção 2.1) apresenta o bem conhecido método de equalização unidimensional [Woods and Gonzalez, 1981], que geralmente é aplicado às imagens em tons de cinza. No entanto, aqui ele é utilizado para equalizar imagens coloridas, aplicando-se tal técnica aos canais R , G e B , separadamente. A segunda (Seção 2.2) ilustra o método proposto em [Trahanias and Venetsapopoulos, 1992].

2.1 Equalização de Histograma 1D

Considere uma variável aleatória contínua absoluta, X , $0 \leq X \leq 1$, com função de densidade de probabilidade cumulativa $F_X(x) = \text{Prob}(X \leq x)$, então a variável $Y = F_X(X)$ será uniformemente distribuída entre $[0, 1]$. No caso discreto, a hipótese de continuidade da variável X não é satisfeita. Então Y será uniformemente distribuída somente aproximadamente. Porém, em relação à distribuição uniforme aproximada de Y , a equalização do histograma dilata efetivamente os valores de níveis de cinza resultando em uma técnica poderosa.

2.2 Equalização de Histograma 3D

Para o espaço de cor 3D, pode-se proceder de uma maneira análoga ao estabelecido anteriormente (Seção 2.1). Sejam três variáveis aleatórias R , G e B (representando os 3 componentes de cores) com uma função de densidade de probabilidade conjunta $f_{R,G,B}(r, g, b)$ e função de distribuição de probabilidade conjunta $F_{R,G,B}(r, g, b) = \text{Prob}(R \leq r, G \leq g, B \leq b)$. Da mesma forma que foi definida a variável $Y = F_X(X)$ no caso 1D, aqui define-se três novas variáveis, uma para cada canal de cor: $R' = F_R(R)$, $G' = F_G(G)$ e $B' = F_B(B)$. As funções de distribuição de probabilidade conjunta de R' , G' e B' são dadas como:

$$\begin{aligned} F_{R',G',B'}(r', g', b') \\ = F_{R,G,B}(F_R^{-1}(r'), F_G^{-1}(g'), F_B^{-1}(b')) \end{aligned} \quad (1)$$

Assumindo agora a independência dos componentes R , G e B , é possível decompor a última equação como um produto das funções de distribuição de probabilidade das três componentes de cores:

$$\begin{aligned} F_{R',G',B'}(r', g', b') \\ = F_R(F_R^{-1}(r')) F_G(F_G^{-1}(g')) F_B(F_B^{-1}(b')) \\ = r' g' b' \end{aligned} \quad (2)$$

Do resultado acima, se conclui que a distribuição uniforme do histograma no espaço R' , G' , B' é garantido somente no caso de independência dos componentes R , G e B . Porém, esta suposição não é válida uma vez que estes componentes são geralmente correlacionados. Métodos que superam estas dificuldades foram propostos que dilatam o histograma ao longo do eixo da componente principal do histograma original [Soha and Schwartz, 1978]. Ou dilatam repetidamente os três histogramas dimensionais [Niblack, 1986]. Uma técnica de equalização através do emprego de um histograma uniforme [Trahanias and Venetsapopoulos, 1992] foi implementada para a comparação do método proposto. Este algoritmo será referido como 3D, uma vez que percorre todo o espaço de busca cúbico da imagem.

3 Método Proposto

Um algoritmo de equalização que leva em consideração a correlação dois a dois entre os canais RGB da imagem é proposto. O objetivo é construir um histograma uniforme a partir dos três histogramas bidimensionais originais, através de um método de especificação de histograma. Ou seja, histogramas uniformes são especificados como histogramas de saída, assim o histograma equalizado é alcançado. Este novo método proposto trabalha com a equalização dos histogramas correlacionados como: equaliza os canais RG , RB e GB , calculando as ocorrências de R com G , R com B e de G com B , obtendo-se probabilidades de RG , RB e GB . A partir dessas probabilidades iniciais, são computadas as probabilidades acumuladas. Para cada entrada (R_x, G_x, B_x) é calculado o produto das probabilidades acumuladas RG , RB e GB , produzindo C_x , como mostra a equação abaixo:

$$C_x = \frac{\text{ProbAccRG}[R_x][G_x] \times \text{ProbAccRB}[R_x][B_x] \times \text{ProbAccGB}[G_x][B_x]}{\text{ProbAccRG}[R_x][G_x] \times \text{ProbAccRB}[R_x][B_x] \times \text{ProbAccGB}[G_x][B_x]} \quad (3)$$

Para cada entrada, tem-se uma saída (R_y, G_y, B_y) , onde, inicialmente, esses valores são configurados como: $R_y = R_x$, $G_y = G_x$ e $B_y = B_x$. A partir dessa saída (R_y, G_y, B_y) é calculado um coeficiente de uniformidade C_y para o histograma de saída a ser especificado, que é dado pela equação:

$$C_y = \frac{(R_y + 1) \times (G_y + 1) \times (B_y + 1)}{L^3} \quad (4)$$

onde L é a quantidade de entradas de cada dimensão do histograma, neste caso 256. O objetivo de estabelecer C_y é encontrar uma saída (R_y, G_y, B_y) mais próxima da entrada (R_x, G_x, B_x) que gere um histograma uniforme ($C_x = C_y$). É importante salientar que existem diversos (R_y, G_y, B_y) que geram histogramas uniformes. Dessa forma, faz-se necessário computar a diferença entre C_x e C_y , visto que o objetivo agora é encontrar uma saída (R_y, G_y, B_y) que minimize a diferença, e.g.

$$Dif = C_x - C_y \quad (5)$$

O algoritmo de minimização de Dif e obtenção da saída (R_y, G_y, B_y) trabalha da seguinte forma. Caso Dif , na Equação 5 seja maior (menor) que 0, então, incrementa-se (decrementa-se) proporcionalmente cada elemento (R_y, G_y, B_y) . A idéia de produzir esse incremento (decremento) proporcional é alcançar mais rapidamente a igualdade entre C_x e C_y . Então, atualiza-se C_y e esse processo é repetido até que Dif se torne igual ou menor (maior) que 0. Dessa forma, dada a entrada (R_x, G_x, B_x) é possível encontrar (R_y, G_y, B_y) , para o histograma de saída, que mais aproxime Dif de zero. Abaixo, é apresentado um resumo dos três passos que constituem a abordagem proposta (a complexidade de tempo de cada passo é dada entre parênteses):

1. ($O(L^2)$) Calcular os três histogramas bidimensionais originais, RG , RB e GB , e de forma iterativa, calcular as probabilidades acumuladas das mesmas;
2. ($O(1)$) Calcular C_x e C_y usando a Equação 3 e a Equação 4, respectivamente;
3. ($O(L)$) Para cada entrada (R_x, G_x, B_x) existente na imagem, encontrar a saída (R_y, G_y, B_y) mais próxima da entrada (R_x, G_x, B_x) , atualizando C_y (Equação 4), de forma que a Equação 5 se aproxime de zero.

4 Experimentos e resultados

Existem inúmeras formas de realizar comparações entre algoritmos. A escolha adequada está em função do objetivo que se deseja alcançar. Neste caso, pretende-se realizar um realce nas imagens, em tempo hábil, que seja fiel às cores originais. Apesar de ser baseado em uma equalização 3D, este algoritmo não prioriza a equalização, ou seja, o equilíbrio do histograma, e sim fatores subjetivos. Testes adequados para a qualificação de tais fatores são difíceis de se encontrar. Para a análise da complexidade de tempo do algoritmo, apenas o tempo de execução foi coletado. Apesar deste valor não classificar um algoritmo como sendo prático, pode inviabilizar sua utilização em determinadas aplicações. A capacidade de realce do algoritmo foi analisada através de uma métrica estabelecida, i.e., o erro médio

Arquivo <i>Bitmap</i>	Resolução	Tamanho
praia	484x399	566Kb
flor	902x600	1.54Mb
ornito	627x408	750Kb
trem	630x389	719Kb
riacho	697x697	1.4Mb
estudantes	361x240	254Kb

Tabela 1: Características das imagens testadas.

quadrático (*mean square error (MSE)*) *pixel a pixel* entre duas imagens. Foram tomadas algumas imagens consideradas com bom contraste, ou seja, equalizadas. Depois, estas imagens consideradas como as ideais, foram desbotadas artificialmente e em seguida tratadas pelos algoritmos. Esta medida informa o quanto este tratamento conseguiu se aproximar da imagem original, e portanto, o quanto ela foi realçada. Esquemáticamente, os testes visam avaliar as seguintes características:

- Fatores objetivos;
 - Qualidade (quantificado pelo *MSE*) do realce;
 - Tempo de execução dos algoritmos.
- Fatores visíveis, subjetivos;
 - Perda de detalhes;
 - Preservação das cores;
 - Visibilidade e nitidez dos objetos.

4.1 Capacidade de Realce Através da Métrica *MSE*

Para a comparação entre duas imagens calcula-se o *MSE* conforme Equação 6, onde m e n são a altura e a largura da imagem; $R_{1(x,y)}$, $R_{2(x,y)}$, $G_{1(x,y)}$, $G_{2(x,y)}$, $B_{1(x,y)}$ e $B_{2(x,y)}$, são os componentes R , G e B das imagens 1 e 2 dos *pixels* com coordenadas espaciais x e y , respectivamente.

Essa comparação entre duas imagens pode ser útil para avaliar a qualidade do realce nas imagens. Tomando-se uma imagem qualquer da *Internet*, é aplicada uma distorção conveniente e então é executada alguma das equalizações. Esta é comparada com a imagem original através do *MSE*. Como o objetivo é qualificar os algoritmos quanto ao realce, uma distorção foi escolhida de forma a retirar o realce das imagens. A redução da saturação foi o efeito utilizado para este fim, porque, qualitativamente, as cores tornaram-se menos vivas. Quanto menor a saturação, mais próximo a imagem se torna de ser puramente tons de cinza.

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{x=1, y=1}^{n, m} (R_{1(x, y)} - R_{2(x, y)})^2 + (G_{1(x, y)} - G_{2(x, y)})^2 + (B_{1(x, y)} - B_{2(x, y)})^2}{3 * n * m}} \quad (6)$$

Imagem	MSE		
	1D	2D	3D
praia	64	52	92
ornito	42	37	93
flor	69	47	95

Tabela 2: Resultados quantitativos (MSE) para comparação dos algoritmos de equalização de histogramas 1D, 2D e 3D.

Um valor intermediário foi usado para que o algoritmo pudesse recompor a força das cores. Essa saturação foi realizada utilizando-se o *software* comercial **Corel PHOTO-PAINT** com parâmetro de saturação -50 , escolhido empiricamente, nas imagens praia, ornito, e flor. Estas são nítidas, bem definidas e possuem cores acentuadas, como pode-se observar na Figura 1. Caso tivesse algum problema relativo a estes fatores, este teste não poderia ser feito, porque a comparação do *MSE* informa quanto o algoritmo conseguiu reverter a distorção artificial. Um bom algoritmo de realce poderia não mostrar sua eficácia, caso a imagem original já tivesse problemas, porque a imagem final poderia ter cores mais realçadas que a imagem original, e assim apresentar um valor *MSE* elevado, o que desqualifica o algoritmo nestas condições.

Para cada imagem x , os algoritmos 1D, 2D e 3D foram aplicadas na seguinte ordem:

$$\underbrace{\text{imagem } x}_{\text{original}} \rightarrow \text{distorção} \rightarrow \text{correção} \rightarrow \underbrace{\text{imagem } y}_{\text{final}}$$

As imagens originais utilizadas nos experimentos são apresentadas na Figura 1, e as imagens resultantes do empobrecimento através da saturação são as respectivas apresentadas na Figura 2.

Os valores obtidos para o *MSE* são mostrados na Tabela 2. Os valores indicam que o método que mais realçou as imagens foi o proposto neste artigo, 2D. Este conseguiu corrigir com maior fidelidade a distorção aplicada. Embora o algoritmo 2D seja uma heurística que reduz a complexidade do 3D, o primeiro teve maior êxito na acentuação das cores em todas as imagens testadas. Talvez o algoritmo 3D consiga uma melhor equalização, obtendo um histograma mais bem distribuído. Portanto, não se pode desqualificar o algoritmo original em função deste resultado. O que se observa é que o novo método é melhor na intensificação das

cores para as imagens testadas.

4.2 Comparação Empírica

Nesta seção, os métodos 1D, 2D e 3D são analisados qualitativamente. Os algoritmos serão aplicados às imagens trem, riacho e estudantes. Para cada aplicação, será estudada a variação visual da imagem e de seu histograma. Dependendo da técnica aplicada, os resultados podem variar quanto ao realce ou perda de detalhes.

A imagem do trem (Figura 3(a)) é escura e suas cores estão, grosso modo, divididas em duas regiões de seu histograma. Na imagem, esta divisão se dá entre o céu claro, e o restante, que é mais escuro. A equalização 1D (Figura 3(b)) reduziu esta disparidade ao estender o histograma. Como este processo não levou em conta a forte correlação das cores existente, a tonalidade dos objetos não é fiel em relação à original. O resultado na equalização 3D (Figura 3(c)) mostrou cores desbotadas e menos intensas em relação à anteriormente obtida. Apesar de ter seu histograma distribuído, a região de concentração de *pixels* foi deslocado para a direita. A imagem tornou-se desbotada com este deslocamento do histograma para uma região mais clara. Quando utilizada a equalização 2D (Figura 3(d)), este efeito colateral não foi constatado. As cores não foram perturbadas como na equalização independente, e a imagem não se tornou tão clara a ponto de se tornar desbotada.

A imagem do riacho (Figura 4(a)) foi escolhida, porque apesar de escura e pouco nítida, tem os componentes *RGB* mais parecidos entre si quando comparado com a imagem do trem (Figura 3(a)). Da mesma forma que no teste anterior, a equalização dos canais independentes gerou uma imagem de cores intensas (Figura 4(b)). Nesta equalização, as cores da imagem do trem tornaram-se artificiais, o que não aconteceu na imagem riacho. O método 3D (Figura 4(c)) novamente gerou uma imagem desbotada. É observado um pico nos canais verde e azul de valor 255 no histograma, o que pode explicar a distorção sofrida. Observe que a curva gerada pelo histograma azul da imagem original é mais larga que os demais canais. Assim, na tentativa de equalizar alguns *pixels*, talvez fosse necessário um valor de *pixel* maior que 255 para o canal azul de forma que as equações propostas para a equalização correlacionada fossem satisfeitas. Então, vários *pixels* têm seu canal azul mapeado para o valor 255, deformando seu histograma. A existência deste problema é citado pelos autores do artigo em sua conclusão. O método proposto gerou uma imagem (Figura 4(d)) praticamente em escala de cinza, uma vez que os canais *RGB* após processo são se-

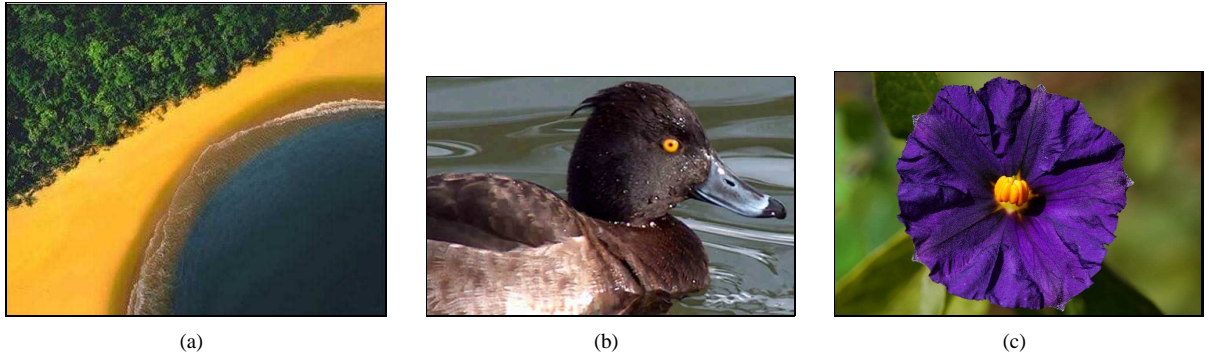


Figura 1: Imagens originais utilizadas nos experimentos.

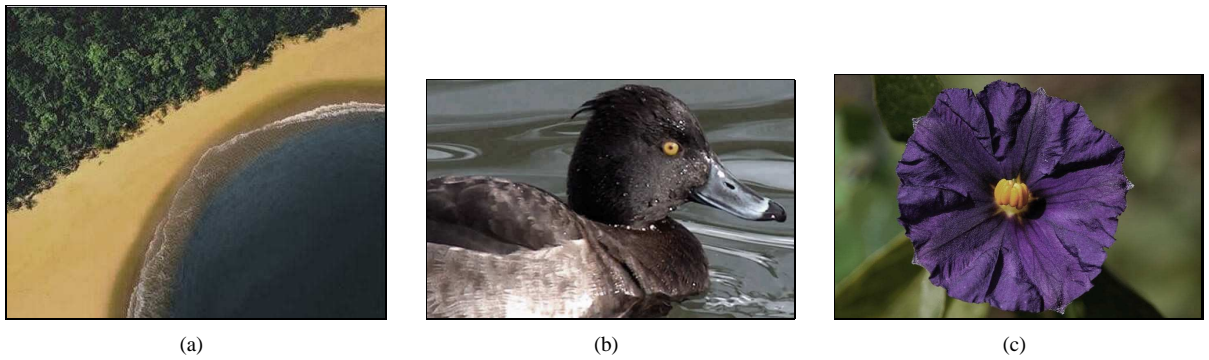


Figura 2: Imagens após diminuição da saturação, geradas a partir das respectivas imagens da Figura 1.

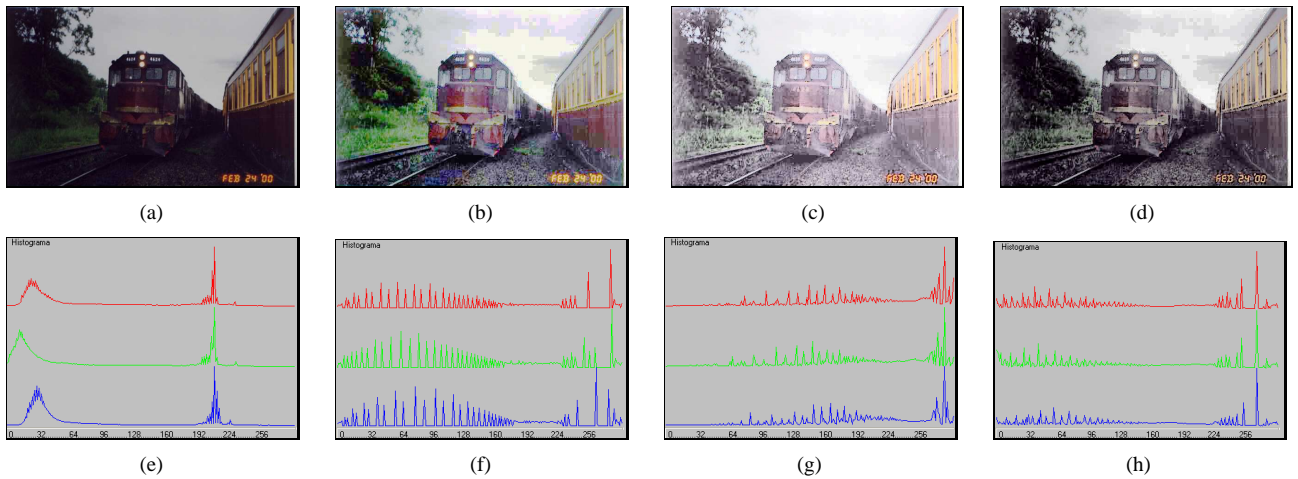


Figura 3: A partir da imagem original do trem (Figura 3(a)), foram aplicados os três algoritmos: $1D$ (Figura 3(b)), $2D$ (Figura 3(d)) e $3D$ (Figura 3(c)). Em seguida, seus respectivos histogramas.

melhantes. A imagem tornou-se mais clara que a original, e portanto, alguns objetos, antes encobertos, tornam-se mais visíveis. Neste fator, este método perdeu para a equalização

independente, além de ser mais clara, a coloração evidente ajuda na distinção entre os objetos. Isto mostra que o algoritmo proposto não funciona bem para realçar imagens que

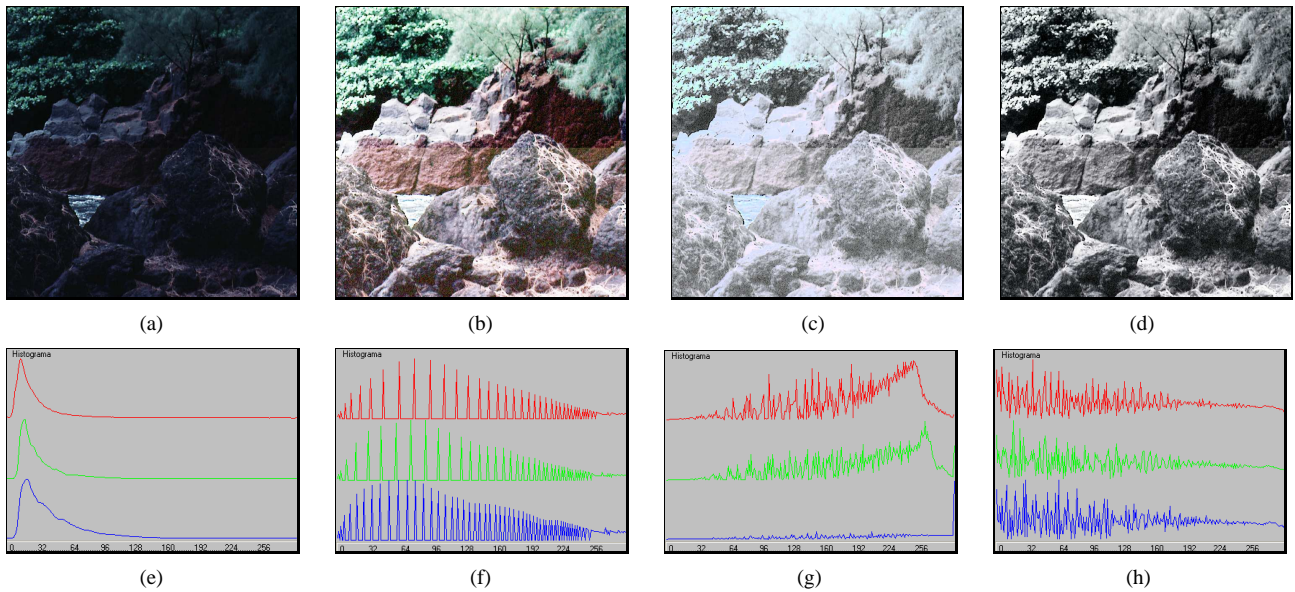


Figura 4: A partir da imagem original riacho (Figura 4(a)), foram aplicados os três algoritmos: 1D (Figura 4(b)), 3D (Figura 4(c)) e 2D (Figura 4(d)). Em seguida, seus respectivos histogramas.

originalmente têm o histograma limitado em uma região, e com poucas diferenças entre seus canais.

A imagem de estudantes (Figura 5(a)) representa aqui a imagem de propósito geral. Seu histograma é bem distribuído em comparação às outras imagens discutidas. Uma correção poderia tornar as pessoas mais reconhecíveis, uma vez que na original a presença de sombra no rosto dos estudantes dificulta a identificação. A que melhor ajudou neste aspecto foi a equalização independente (Figura 5(b)). A imagem tornou-se mais clara, e a sombra tornou-se menos perceptível. No entanto, as cores não foram preservadas e a compactação *JPEG* (*Joint Photographic Experts Group*) tornou-se evidente. Na equalização 3D (Figura 5(c)), a sombra praticamente não aparece, nem o efeito colateral da compactação da imagem. No entanto, o reconhecimento das pessoas tornou-se mais difícil, e a imagem perdeu definição, pois detalhes das árvores e do céu foram perdidos. A imagem resultante do algoritmo proposto (Figura 5(d)) não apresenta tais deformações de seu antecessor. Na tentativa de ser fiel à correlação entre as cores originais, o resultado difere menos do original em relação ao método independente.

4.3 Complexidade de Tempo

Os algoritmos 1D, 2D e 3D foram comparados quanto ao tempo de execução (em segundos) obtido através do comando **time**, nativo do *Linux*. O resultado apresentado na

Tabela 3 é a média de três execuções ¹.

Conforme observado no artigo em que foi proposto [Trahanias and Venetsapopoulos, 1992], o algoritmo 3D não é viável para aplicações de tempo real ou para dispositivos móveis que dispõem de pouca energia. Vale observar que sua implementação seguiu todas as otimizações propostas pelo autor. A diferença de tempo entre o método 2D e o 3D é explicada pela complexidade dos algoritmos. O primeiro varre três matrizes bidimensionais (L^2), enquanto o segundo percorre uma única matriz tridimensional (L^3). Já o método 1D é o mais rápido, visto que tem complexidade de tempo linear ($O(L)$). No entanto, o método proposto 2D, apesar da complexidade quadrática em relação a L , pode ser sugerido para aplicações que possam ser implementadas em dispositivos *DSP* (*Digital Signal Processing*).

Arquivo	Tempo (s)		
	1D	2D	3D
riacho	0.098	3.407	105.636
trem	0.023	0.985	106.751
estudantes	0.035	0.194	80.413

Tabela 3: Complexidade de Tempo.

Ressalta-se aqui novamente que a complexidade de

¹O sistema operacional escolhido foi o *Linux*, com a distribuição SuSe 9.1. Foi utilizado o processador *Pentium IV* 3.0 GHz com 1 GB de memória RAM.

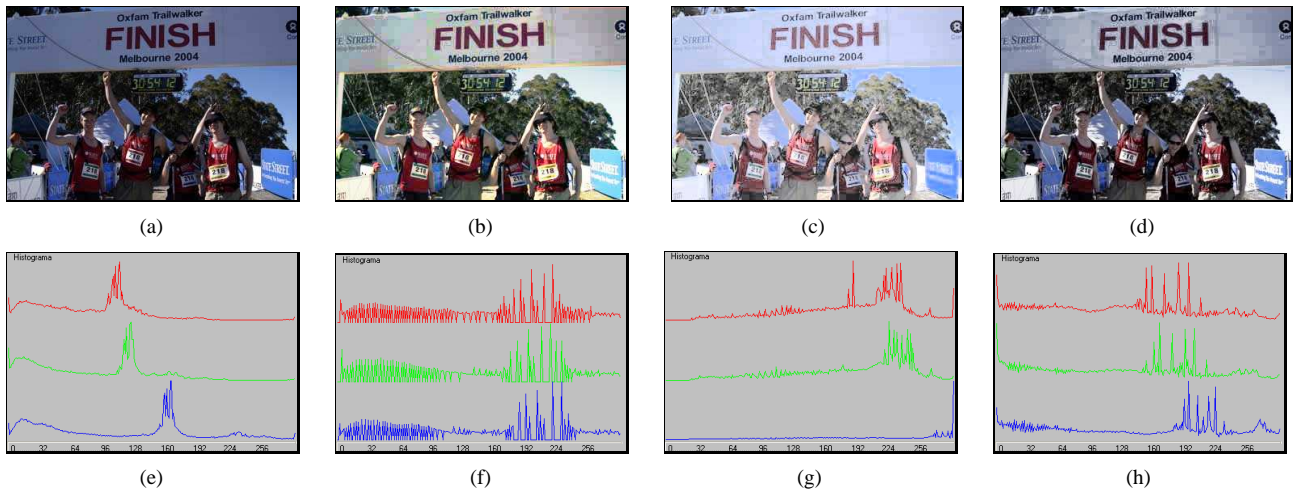


Figura 5: A partir da imagem original estudantes (Figura 5(a)), foram aplicados os três algoritmos: 1D (Figura 5(b)), 2D (Figura 5(d)) e 3D (Figura 5(c)). Em seguida, seus respectivos histogramas.

tempo dos métodos 1D, 2D e 3D são $O(L)$, $O(L^2)$ e $O(L^3)$, respectivamente. No entanto, o método proposto aqui, 2D, possui complexidade de tempo, no passo de busca linear, ou seja, $O(L)$. Mas, o limite é elevado para $O(L^2)$ devido ao passo de construção dos histogramas 2D.

Método	Complexidade de Espaço	Memória Utilizada
1D	$O(L)$	9 Kb
2D	$O(L^2)$	1.6 Mb
3D	$O(L^3)$	576 Mb

Tabela 4: Complexidade de Espaço e Memória Utilizada.

4.4 Complexidade de Espaço

Nesta seção, apresenta-se a quantidade de memória utilizada pelos algoritmos de equalização aqui utilizados. Independentemente do método, é exigido a armazenagem da imagem de entrada e sua versão equalizada, a imagem de saída. No entanto, o foco dessa análise está sobre o tamanho dos histogramas que são utilizados pelos métodos 1D, 2D e 3D. Estes são diretamente dependentes de L (i.e., número de quantizações de cada canal, 256 valores).

Na versão 1D, são alocados três histogramas unidimensionais (R , G e B). A versão 3D utiliza somente um único histograma tridimensional (RGB). Já o método proposto aqui utiliza três histogramas bidimensionais (RG , RB e GB).

A Tabela 4 apresenta a complexidade de tempo dos métodos, bem como os valores de memória utilizados para a equalização de uma das imagens utilizadas nos experimentos. Esses valores mostram que o sistema computacional envolvido no processo 3D, caso não disponha de memória suficiente, pode apresentar um tempo de relógio de grandeza maior que aquele apresentado na Tabela 3, em consequência da utilização de memória secundária pelo sistema operacional.

5 Discussão

A equalização dos canais independentes é rápida e pouco exigente computacionalmente. Sua imagem resultante tem cores bastante vivas, o que pode ser um benefício dependendo da aplicação. Os dois algoritmos seguintes tentam superar o problema da equalização independente ao dispor da dependência entre os canais de cores. O método 3D, por efetuar a busca em um espaço maior (tridimensional), torna-se um algoritmo caro tanto em tempo e espaço. O sucesso deste método é dependente da imagem que se deseja equalizar. Quanto mais *faded* for a imagem original, mais desbotada é a aparência do resultado. Ao transformar a análise de espaço de cores de 3D para 2D, o algoritmo proposto resolve este problema levando ainda em conta a correlação entre as cores. A versão proposta neste artigo não funciona bem com imagens em que os três canais são bem similares, produzindo uma imagem que se aproxima à uma imagem de tons de cinza. Portanto, apesar de ter uma complexidade menor, o algoritmo proposto também depende da imagem de entrada.

O realce observado com este algoritmo conseguiu levantar informações antes não percebidas visivelmente. A

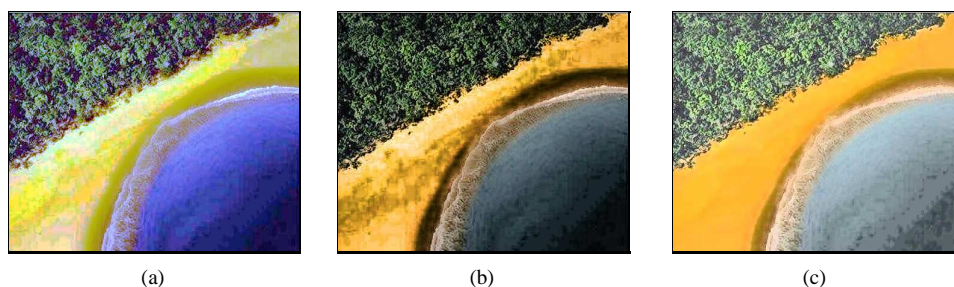


Figura 6: Equalização da Figura 1(a) pelos três métodos. Pode-se observar que na Figura 6(b), resultado da equalização 2D, é destacada uma névoa no meio da areia, não visível na imagem original nem nas equalizações 1D (Figura 6(a)) ou 3D (Figura 6(c)).

Figura 6(b) mostra uma região de pontos escuros no meio da praia que não foram destacados pelos outros métodos. Embora não se saiba o que pode ter ocasionado o aparecimento de tal mancha, este método talvez possa ser usado como preparação para recuperação de informação.

6 Conclusão

Neste trabalho, foram estudados os métodos de equalização de histogramas, partindo-se do tradicional que é a equalização independente dos canais R , G e B (1D). Foi descrita a equalização de histogramas 3D [Trahanias and Venetsapopoulos, 1992] que leva em consideração a dependência entre os histogramas dos canais R , G e B com complexidade cúbica ($O(L^3)$). O método proposto responde em tempo bem menor que o 3D devido à sua complexidade quadrática ($O(L^2)$). Essa redução se mostrou também no consumo de memória, permitindo assim, sua execução em um sistema computacional mais simples. Assim, o método passa a ser utilizável em dispositivos que demandem pouca energia e é viável em aplicações de tempo real. Além disso, revelou-se um bom método para realce das cores, quando adotado o MSE como métrica. O algoritmo funcionou bem para imagens com os canais RGB altamente correlacionados, e mostrou sua falha quando os histogramas dos canais RGB são parecidos. Ao se equalizar uma imagem bem nítida (Figura 1(a)), o algoritmo revelou manchas inesperadas, sugerindo-se, assim, pesquisar como esta equalização pode ser utilizada para pré-processamento em recuperação de dados de imagens. Trabalhos futuros devem ser realizados, para verificar se métodos de realce através de equalização de histogramas são eficazes em imagens coloridas com histogramas correlacionados. Visto que métodos baseados em histogramas, de um forma geral, lidam com a informação global e não local da imagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES, pelo suporte financeiro para realização deste trabalho.

Referências

- [Bockstein, 1986] Bockstein, I. M. (1986). Color equalization method and its application to color image processing. *Journal of the Optical Society of America*, 3(5):735–737.
- [Jain, 1989] Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of digital image processing*. Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ.
- [Niblack, 1986] Niblack, W. (1986). *An introduction to digital image processing*. Prentice Hall.
- [Pichon et al., 2003] Pichon, E., Niethammer, M., and Sapiro, G. (2003). Color histogram equalization through mesh deformation. In *Proceedings of ICIP'2003*, pages 117–120.
- [Soha and Schwartz, 1978] Soha, J. M. and Schwartz, A. A. (1978). Multidimensional histogram normalization contrast enhancement. In *Proceedings of 5th Canadian Symposium on Remote Sensing*, pages 86–93.
- [Strickland et al., 1987] Strickland, R. N., Kim, C. S., and McDonel, W. F. (1987). Digital color image enhancement based on the saturation component. *Optical Engineering*, 26(7):609–616.
- [Trahanias and Venetsapopoulos, 1992] Trahanias, P. E. and Venetsapopoulos, A. N. (1992). Color image enhancement through 3-d histogram equalization. In *Proceedings of ICPR'1992*, pages 545–548.
- [Woods and Gonzalez, 1981] Woods, R. E. and Gonzalez, R. C. (1981). Real-time digital image enhancement. In *Proceedings of IEEE*, volume 69, pages 634–654.