

Restauração de imagens CCD/CBERS-2 pelo método de Richardson-Lucy modificado

Paulo Eduardo Ubaldino de Souza ¹

¹Instituto de Estudos Avançados - CTA/IEAv
12228-840 – São José dos Campos - SP, Brasil
souza@ieav.cta.br

Abstract. This paper describes a method for CCD/CBERS-2 image restoration based on a changed Richardson-Lucy (RL) algorithm which removes blurring but avoids the amplification of noise that occurs in RL method.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, restoration, sensoriamento remoto, processamento de imagens, restauração, CBERS, CCD.

1. Introdução

A política de distribuição gratuita de imagens do CBERS-2, adotada pelo INPE, gerou uma grande demanda destes produtos e uma considerável comunidade de usuários.

Porém, uma característica de imagens de sensores CCD é a aparência desfocada, como mostra a **Figura 1**, o que causa diversas dificuldades para aplicações onde a resolução espacial é essencial.

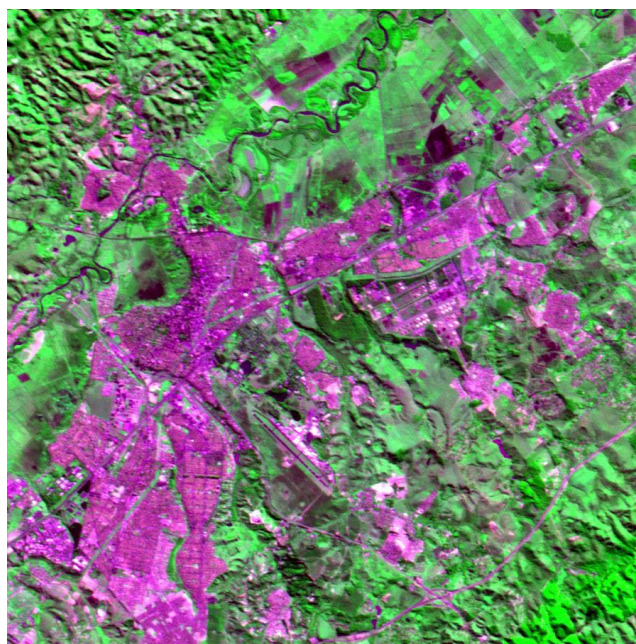


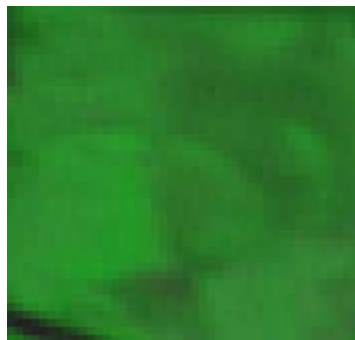
Figura 1 – Composição RGB-342 da câmera CCD/CBERS-2. Cidade de São José dos Campos – SP.

De acordo com Schowengerdt (1997), este efeito é causado pela função de espalhamento pontual (PSF), onde a energia de um *pixel* contamina seus vizinhos, conforme apresentado na **Equação 1**.

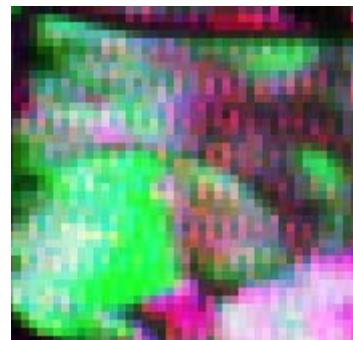
$$g(x,y) = \text{PSF} * f(x,y) \quad (1)$$

onde, $f(x,y)$ é a imagem observada e $g(x,y)$ é a imagem deteriorada pela PSF.

Embora seja imperceptível em uma imagem com contraste linear, outra característica das cenas CCD dos satélites CBERS, citada por Souza (2003), é o ruído eletrônico gerado pela diferença nos quantizadores dos detectores pares e ímpares, conforme apresentado nas ampliações mostradas na **Figura 2**.



Contraste original



Bandas equalizadas

Figura 2 – Ruído eletrônico presente nas imagens CCD/CBERS-2.

Várias são as abordagens para se restaurar uma imagem, no entanto, boa parte delas envolve o conhecimento prévio preciso dos fatores ópticos e eletrônicos que causaram a sua degradação, conforme apresentado por Boggione (2003). Porém, estas informações são difíceis de serem obtidas por um usuário comum, além de poderem se modificar ao longo do tempo, com a deteriorização do sensor. Portanto, o presente trabalho propõe uma restauração quase “às cegas”, onde algumas hipóteses são consideradas e testadas ao longo do processo.

2. Formação da imagem de sensoriamento remoto

Segundo Schowengerdt (1997), o GIFOV (Ground Instantaneous Field of View) é a projeção geométrica na superfície de cada detector do sensor e o GSI (Ground Sample Interval) é a distância entre *pixels*. Em um sensor ideal, a resolução espacial é igual ao GSI, que por sua vez é igual ao GIFOV, conforme mostra a **Figura 3**.

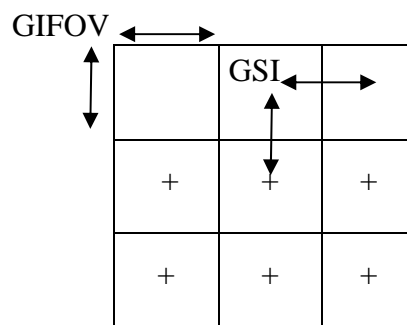


Figura 3 – Formação da imagem de um sensor típico.

Fonte – Adaptado de Schowengerdt (1997), p. 21.

Já, em um sensor real, a resolução espacial da imagem é degradada pela PSF (**Equação 1**). Ainda segundo Schowengerdt (1997), a PSF total é composta pela convolução da PSF do sistema óptico (PSF_{opt}), da PSF gerada pelo movimento do sensor durante o imageamento (PSF_{IM}), da PSF da área do detector (PSF_{det}) e da PSF dos filtros eletrônicos de redução de ruído (PSF_{el}), conforme mostra a **Equação 2**.

$$PSF = PSF_{opt} * PSF_{IM} * PSF_{det} * PSF_{el} \quad (2)$$

Neste caso o GIFOV efetivo é maior que o geométrico, conseqüentemente, o tamanho do *pixel* (dado pelo GSI) é menor que o GIFOV real, o que faz com que cada *pixel* represente a integração da energia do GIFOV teórico com parte da energia de seus vizinhos.

Gonzalez e Woods (2000) apresenta um modelo do processo de degradação onde um operador H (como a função de espalhamento pontual - PFS), juntamente com um termo de

ruído aditivo $n(x,y)$, opera sobre uma imagem de entrada $f(x,y)$ para produzir uma imagem degradada $g(x,y)$, de acordo com a **Figura 4**.

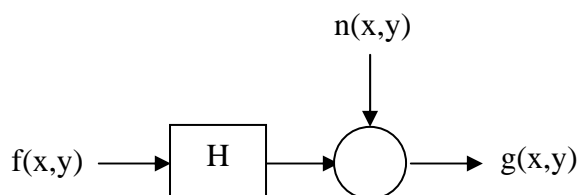


Figura 4 – Um modelo do processo de degradação da imagem.

Fonte – Gonzalez (2000), p. 181.

A relação entrada-saída na **Figura 4** é expressa como:

$$g(x,y) = H[f(x,y)] + n(x,y) \quad (3)$$

3. O algoritmo Richardson-Lucy

O algoritmo de Richardson-Lucy (RL), proposto por Richardson (1972) e Lucy (1974), é uma técnica amplamente utilizada na restauração de imagens astronômicas, como as do telescópio Hubble, e também imagens biomédicas. Ele é derivado da expressão de máxima verossimilhança para imagens onde o ruído aditivo possui uma distribuição de Poisson ou Gaussiana (White, 1994). O algoritmo RL para a solução iterativa de $f(x,y)$, para um ruído gaussiano, é dado por:

$$f_{k+1}(x,y) = f_k(x,y) + H * g((x,y) - H * f_k(x,y)) \quad (4)$$

onde $*$ é o operador de correlação e $*$, o de convolução.

Segundo Bi e Börner (1994), o método RL pode remover o ruído de cada *pixel*, de imagens de sensores CCD, sem degradar a resolução original do detector e é um método em potencial para processar imagens de sensoriamento remoto orbital. Porém, como toda técnica iterativa de verossimilhança, pode causar o aparecimento de “*speckles*” se forem feitas mais iterações do que o necessário (White, 1994). A prática usualmente utilizada é parar as iterações quando na imagem restaurada começam a aparecer novas feições. Não existe ainda um critério robusto que possa dizer quando se deve interromper o algoritmo (White, 1994). Isto é especialmente correto quando se trata de imagens orbitais de alvos terrestres, pois a maioria dos testes com este algoritmo são realizados com imagens artificialmente deterioradas, onde os diversos fatores causadores das distorções (**Equação 1**) não podem ser perfeitamente estimados; ou com imagens de telescópios e microscópios, onde há um grande contraste entre o alvo, geralmente pontual e com elevado nível digital, e o fundo da cena, normalmente escuro, com nível digital próximo a zero.

3. Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, a PSF da câmera CCD/CBERS-2 foi considerada como uma função gaussiana.

Inicialmente foram testadas três possibilidades para o desvio padrão: 10, 15 e 20 metros, conforme apresentado na **Figura 5**.

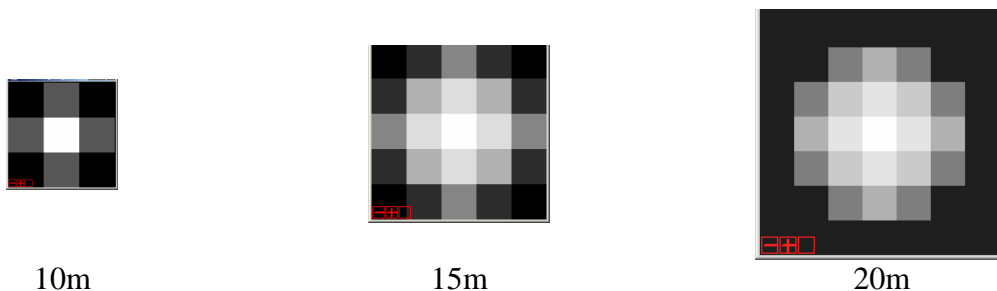


Figura 5 – Desvios padrões das PSFs testadas.

Para a PSF de 10m foi utilizada uma máscara de 3x3 *pixels*, para as de 15 e 20 metros foram utilizadas máscaras de 5x5 e 7x7 *pixels*, respectivamente. Após 40 iterações do algoritmo RL foram obtidos os resultados mostrados na **Figura 6**.

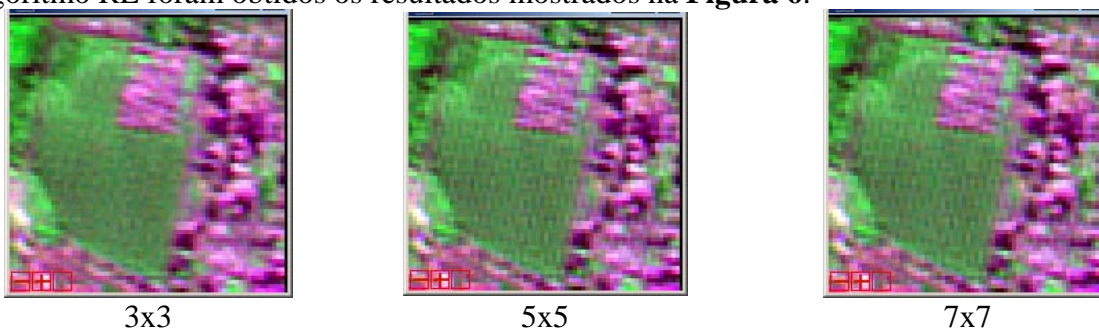


Figura 6 – Resultados obtidos após 40 iterações do método RL.

A máscara 3x3 causou pouca melhora na imagem testada. Já as máscaras 5x5 e 7x7 apresentaram resultados muito similares, como mostram as imagens diferença da **Figura 7**.



a - Diferença entre 3x3 e 5x5

b - Diferença entre 5x5 e 7x7

Figura 7 – Imagens diferença dos testes preliminares de PSF.

Na **Figura 7** a cor cinza representa valores semelhantes e as cores vermelha e azul, as diferenças positivas e negativas. A fim de minimizar os custos computacionais, foi selecionada a máscara de 5x5 para o presente estudo.

Para avaliar o número ideal de iterações do algoritmo RL, foram realizados testes com 10,30 e 50 iterações, conforme mostra a **Figura 8**.

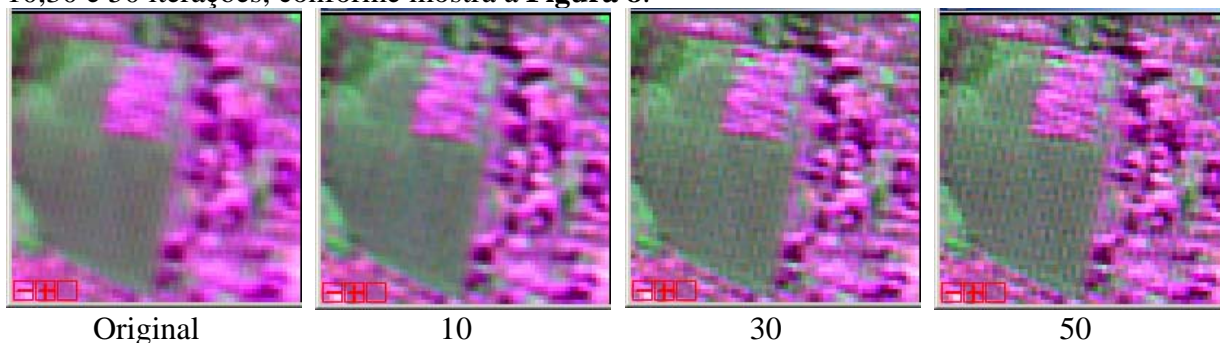


Figura 8 – Avaliação do número de iterações do algoritmo RL.

Com o aumento do número de iterações, a imagem vai se tornando mais nítida, porém o ruído eletrônico do sensor também vai sendo amplificado, o que é facilmente observado nas áreas mais homogêneas da imagem (**Figura 8**). Como o algoritmo RL na primeira iteração apenas aplica a PSF estimada à imagem, o que, neste caso, corresponde a uma filtragem “passa-baixa”, o interrompimento prematuro das iterações e a reaplicação nesta imagem resultante gera uma imagem com menor ruído. Neste estudo, dentre as várias combinações testadas, foi selecionada a 40+10, onde inicialmente são realizadas 40 iterações e no resultado são aplicadas mais 10 iterações.

Ainda para minimizar as variações dos níveis digitais de regiões homogêneas, adotou-se a seguinte abordagem: foi passado um filtro Sobel na imagem original, o resultado deste filtro (detecção de bordas), mostrado na **Figura 9**, foi normalizado para valores entre 0 e 1 e utilizado como um filtro ponderador (p) entre a imagem original e o resultado final do algoritmo RL40+10, conforme apresenta a **Equação 5**.

$$f(x,y) = f_k(x,y)*p + g(x,y)*(1-p) \quad (5)$$

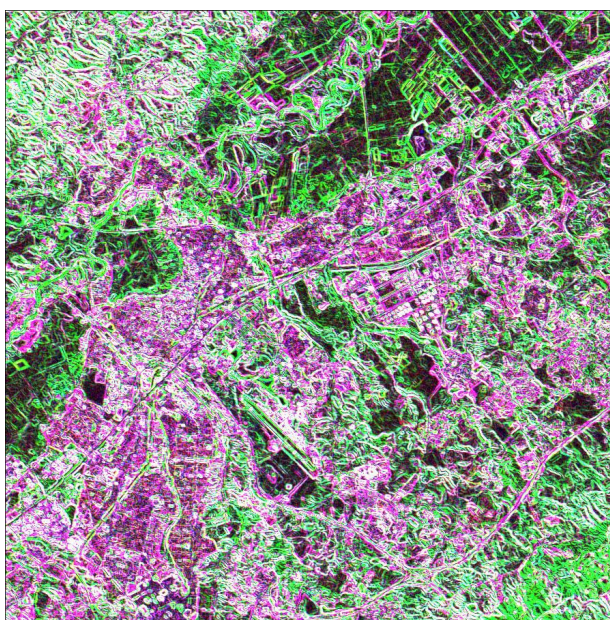


Figura 9 – Composição RGB-342 do filtro Sobel normalizado.

A **Figura 9** mostra a aplicação do filtro Sobel sobre a imagem original. Como esta imagem é desfocada, ela gera bordas maiores do que as reais, marcando assim as áreas onde o algoritmo deve ter maior influência, e vice-versa. Desta forma, o algoritmo RL passa a ter influência diretamente proporcional às altas frequências da imagem.

4. Resultados

A **Figura 10** apresenta a imagem original, os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo RL com 40 iterações (RL40), RL40+10 e este ponderado pelo filtro Sobel (RL40+10p).

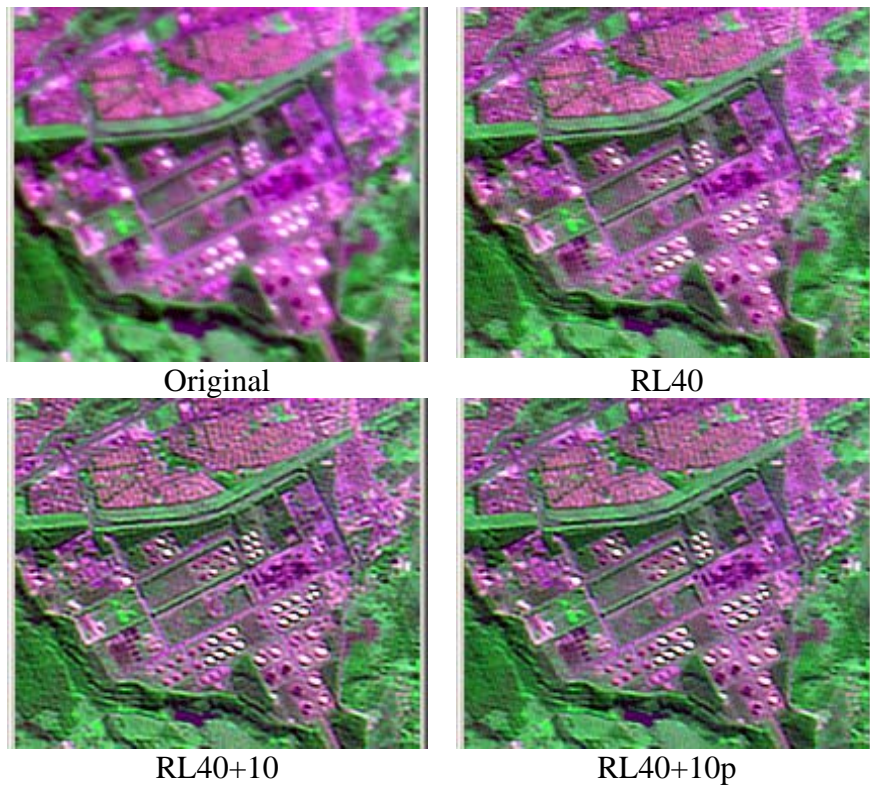


Figura 10 – Resultados obtidos com os algoritmos testados.

Observa-se, claramente, uma melhora visual nos resultados apresentados nas imagens da **Figura 10**. Os alvos circulares e o arruamento da cidade estão bem mais definidos nas duas últimas imagens. Na **Figura 11** são apresentadas áreas homogêneas e heterogêneas ampliadas.

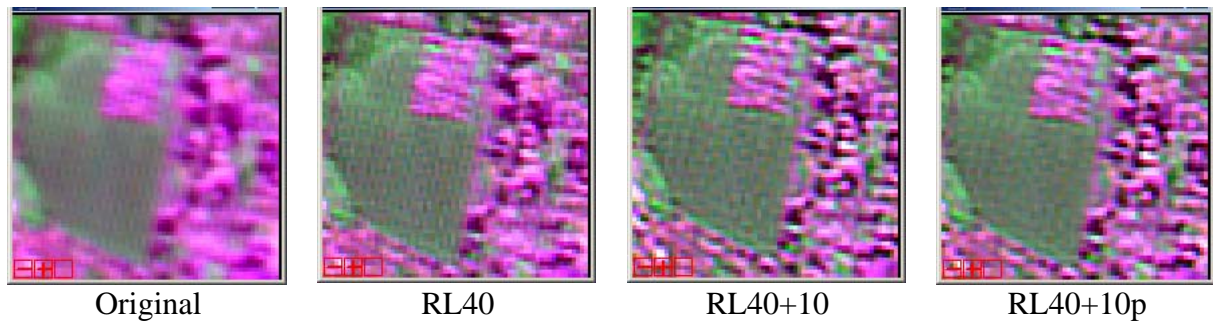


Figura 11 – Avaliação dos resultados em áreas homogêneas e heterogêneas do algoritmo RL modificado.

Na **Figura 11**, percebe-se a redução do ruído eletrônico nas áreas homogêneas após a ponderação do resultado com a imagem original, com pouca perda nas áreas de alta frequência.

Na **Figura 12** são apresentadas as transformadas de Fourier das imagens citadas anteriormente.

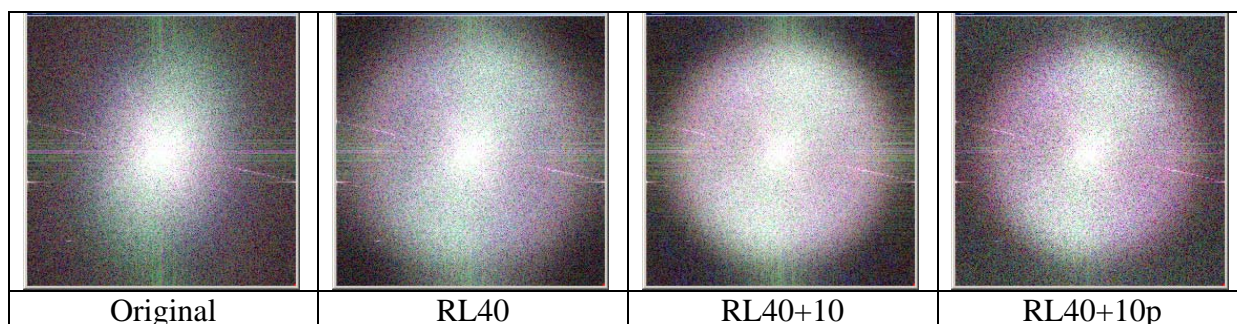


Figura 12 – Transformadas de Fourier dos resultados do algoritmo RL modificado.

A imagem original apresentou, como era de se esperar, poucas altas frequências, sendo que a Banda 4 (verde) apresentou mais bordas que as demais bandas observadas. O algoritmo RL40 causou uma expansão das altas frequências e uma equalização entre as bandas. Já o RL40+10 reduziu ligeiramente as altas frequências em relação ao algoritmo anterior, eliminando parte do ruído eletrônico. Finalmente, a ponderação reduziu ainda mais as altas frequências causadas pelo ruído.

A **Tabela 1** apresenta as estatísticas destes resultados.

Original	Banda	Min	Max	Média	Desvio Padrão
	2	35	255	59.831323	10.057585
	3	15	173	31.332268	7.130416
RL40	Banda	Min	Max	Média	Desvio Padrão
	2	3	255	59.330498	11.415434
	3	0	255	30.832343	7.921121
RL40+10	Banda	Min	Max	Média	Desvio Padrão
	2	0	255	58.825616	13.953143
	3	0	255	30.332325	9.286470
RL40+10p	Banda	Min	Max	Média	Desvio Padrão
	2	0	255	58.759326	13.405453
	3	0	255	30.257770	8.968320
	4	0	255	91.718860	20.313118

Tabela 1 – Estatísticas dos resultados observados.

A **Figura 13** apresenta outro resultado do algoritmo em uma imagem de Brasília-DF.

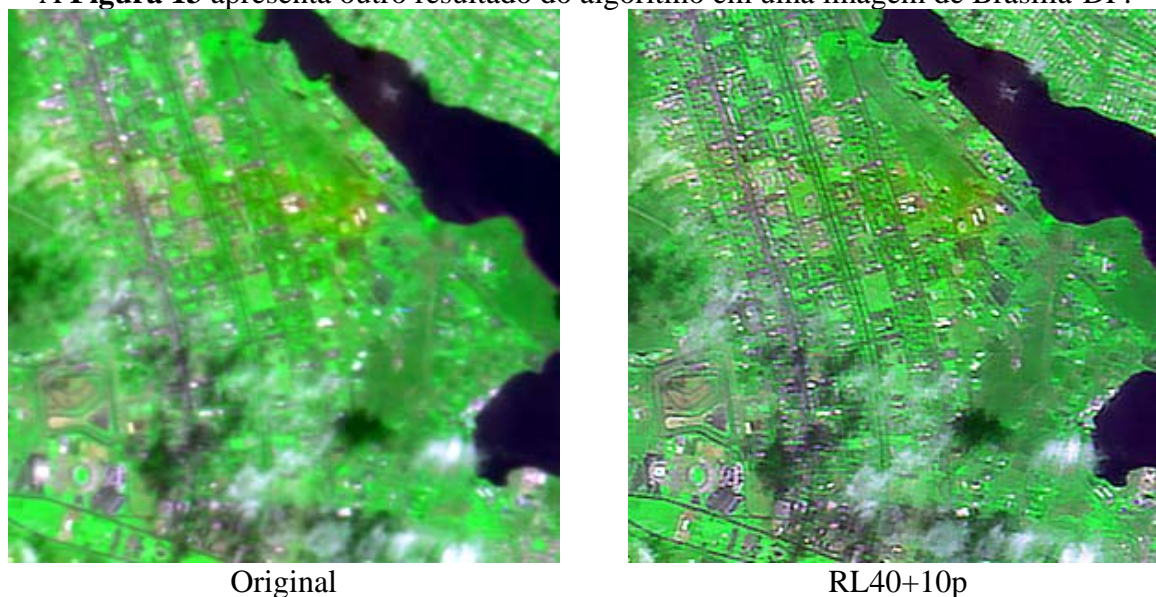


Figura 13 – Composição RGB-342 da imagem de Brasília-DF.

4. Conclusões

Embora os resultados sejam ainda preliminares, o algoritmo proposto demonstrou ser eficiente, robusto e de fácil implementação. Todas as imagens restauradas apresentaram uma expressiva melhora visual sem a ampliação do ruído eletrônico.

5. Trabalhos futuros

Está sendo desenvolvido um algoritmo genético que possa estimar uma solução ótima, testando outras hipóteses tais como: PSF oval, desvios padrões diferentes para cada banda, correlação entre linhas e colunas da imagem georreferenciada, diferentes tamanhos da janela de deconvolução, número ideal de iterações, etc. Para tal está em estudo a definição de uma métrica robusta que possa comparar a qualidade da imagem processada com a original.

Referências

- Bi, H.; Börner G. When does the Richardson-Lucy deconvolution converge? **Astronomy & Astrophysics Supplement Series**, n. 108, p. 409-415, 1994.
- Boggione, G. A. **Restauração de imagens do satélite Landsat-7**. 2003. 162 p. (INPE-10462-TDI/929). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.
- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2000. 509 p.
- Lucy, B. L. An iterative technique for the rectification of observed images. **The Astronomical Journal**, v. 79, n. 6, p. 745-754, 1974.
- Richardson, W. H. Bayesian-based iterative method of image restoration. **Journal of the Optical Society of America**, v. 62, n. 1, p. 55-59, 1972.
- Schowengerdt, R. A. **Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing**. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.
- Souza, P. E. U. **Calibração radiométrica da câmera CCD/CBERS-1**. 2003. 160 p. (INPE-10241-TDI/902). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.
- White, R. L., Image restoration using the damped Richardson-Lucy Method. In R. J. Hanisch and R. L. White, editors, **The Restoration of HST Images and Spectra II**, Baltimore: Space Telescope Science Institute, 1994.