

Detecção e compensação de sombras em imagens de áreas urbanas densas com alta resolução espacial

Detection And Compensation Of Shadows From Dense Urban High-Resolution Remote Sensing Images

Samara Calçado de Azevedo¹ Erivaldo Antônio da Silva² Guilherme Pina Cardim³

Para citar este artículo: Calçado de Azevedo, S., da Silva E.A. & Pina-Cardim, G. (2017) Detecção e compensação de sombras em imagens de áreas urbanas densas com alta resolução espacial. *UD y la Geomática*, 12, 5-12.

Fecha de recepción: 25 de julio de 2017

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2017

RESUMO

Novas possibilidades para o mapeamento urbano vêm sendo criadas com o aumento no detalhamento das imagens. Contudo, as imagens acabam sofrendo com informações indesejadas ocasionadas por objetos elevados, como é o caso da grande quantidade de áreas de sombras, que influenciam na resposta espectral dos alvos e dificultam muitas aplicações. Dessa forma, este trabalho tem como principal objetivo estabelecer uma metodologia capaz de detectar e compensar os efeitos das sombras. O algoritmo proposto e implementado no Matlab utiliza propriedades de operadores morfológicos combinados para detectar as sombras, a partir do baixo padrão de respostas que elas apresentam nas imagens. O top-hat por fechamento de área consegue realçar as sombras que são detectadas na sequência pela binarização automática. Na compensação, o matching de histograma local é aplicado, combinando as estatísticas de cada região de sombras com sua vizinhança. O método foi testado em imagens WorldView-2 da área urbana de São Paulo. A análise dos resultados mostrou que a metodologia conseguiu identificar a maioria das áreas de sombras, comprovado pelos índices de completude e correção calculados, e homogeneizar as diferenças radiométricas ocasionadas pelas

sombras. Melhorias devem ser incorporadas no sentido de diminuir confusões e aumentar a discriminação dos alvos sob sombras.

Palabras clave: Compensação de sombras, Detecção de sombras, Imagens de alta resolução, Processamento morfológico de imagens..

ABSTRACT

New possibilities for urban mapping are being created with increased detailing of images. However, the images has been hampered with unwanted information caused by high objects, such as the large amount of shadow areas, which influence in spectral response of the targets and may have impacts to many applications. Thus, this paper aims to establish a methodology able to detect and compensate shadows effects. The proposed algorithm implemented on Matlab, uses properties of morphological operators combined to detect shadows from the low intensity property that they present on the images. The black top-hat by area closing can highlight shadows that are detected in the following with automatic binarization. In the

- 1 Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – UNESP. Correo electrónico: samara_calçado@hotmail.com
- 2 Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – UNESP. Departamento de Cartografia – UNESP. Correo electrónico: silva.erivaldo@gmail.com
- 3 Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – UNESP. Correo electrónico: gpcardim@gmail.com

compensation step, local histogram matching was applied to combine statistics of each shadow areas and their neighborhood. The method was tested on WorldView-2 images from urban area of São Paulo. The results showed that the method was able to identify most shadow areas, confirmed by completeness and correctness index, and minimizing the radiometric

differences caused by shadows. Improvements should be incorporated in order to reduce confusion and increase the object discrimination under shadows.

Key words: Shadow compensation, Shadow detection, High resolution images, Morphological image processing.

Introdução

A demanda crescente de informações sobre a superfície terrestre, ocasionada pela facilidade e disseminação dos mapas digitais, tem reflexo direto no desenvolvimento de sensores remotos capazes cada vez mais, de proporcionar imagens com um alto nível de detalhes. Essas imagens de alta resolução espacial no entanto, ao mesmo tempo que ampliaram as possibilidades de aplicação, acarretaram em novos desafios tanto para o processamento, quanto para a extração de informação e análises dessas imagens (Meneses & Almeida 2012). Um desses desafios é a constante presença de sombras nas imagens, ocasionada pela obstrução da iluminação por objetos elevados sobre a superfície. Em áreas urbanas densas, compostas em sua maioria por altos edifícios e feições antrópicas, as sombras ocupam parte significativa da imagem, podendo reduzir seu uso efetivo e prejudicar aplicações como a classificação e a detecção de mudanças (Liu & Yamazaki 2012).

Na literatura, muitos são os trabalhos que buscam corrigir os efeitos das sombras. Em geral, os métodos identificam características radiométricas fornecidas pelas sombras para separar essas regiões dos demais objetos da imagem. Na detecção, existem ainda trabalhos que necessitam de outras informações, como em Zhan *et al.* (2005), que utilizou o conhecimento tridimensional da cena e dos objetos, a partir de um modelo digital de superfície, para projetar a localização das sombras na imagem. Uma desvantagem nesses métodos, de acordo com a recente revisão apresentada por Adeline *et al.* (2013), é a dependência direta do resultado em função da qualidade dos dados empregados, sendo que técnicas mais simples e com pouca intervenção do usuário, podem obter melhores resultados. No caso dos métodos de correção, as abordagens variam com os tipos de objetos que ocasionaram a sombras e com o tipo do sensor, segundo Shahtahmassebi *et al.* (2013). Isto quer dizer por exemplo, que uma técnica aplicada para correção de sombras topográficas não tem resultados garantidos em áreas urbanas. Os autores ainda concluíram que devido ao desenvolvimento de novos dados de Sensoriamento Remoto (SR), são necessários novos algoritmos e a necessidade de desenvolver um que seja padrão, para poder ser implementado nos *softwares* de SR.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é contribuir com uma metodologia para detecção e compensação dos efeitos das sombras em imagens de satélite de alta resolução espacial, de forma que possa ser aplicada num contexto geral,

sem que sejam necessárias informações além da própria imagem. Assim, o algoritmo identifica sombras a partir da principal característica apresentada por elas nas imagens, que é o baixo padrão de resposta, através de operadores morfológicos por subtração, chamado *top-hat*. Um *matching* de histograma local é então aplicado para corrigir as áreas sombreadas e compensar as diferenças radiométricas introduzidas por estas. A eficácia da metodologia foi testada em imagens WorldView-2 da cidade de São Paulo, cuja área urbana é a mais densa da América do Sul. Além disso, os resultados obtidos na detecção foram avaliados a partir de índices de qualidade, permitindo verificar a viabilidade do processamento morfológico de imagens no contexto da detecção de sombras.

Processamento morfológico na detecção de sombras

O processamento morfológico de imagens (PMI) tem sido utilizado em muitos contextos e aplicações como uma ferramenta para extrair componentes das imagens, úteis na representação e descrição da forma de uma região (Gonzales & Woods 2010). O PMI tem como princípio básico, de acordo com Facon (1996), extrair informações relativas à geometria e à topologia de um conjunto desconhecido da imagem, por meio de um conjunto completamente conhecido denominado elemento estruturante (EE).

O PMI fornece ferramentas para detecção de padrões escuros nas imagens, também chamadas de transformação *top-hat* por fechamento (*BTH*), que consiste na diferença aritmética entre o fechamento da imagem original $\phi(f)$ e a imagem original f (Soille 2004). Contudo, neste caso, o fechamento por área foi utilizado na metodologia proposta como forma de não haver mais a restrição na determinação da forma do EE, uma vez que as sombras não possuem um padrão definido. Dessa forma, a restrição passa a ser no tamanho da área de seus objetos conectados. O fechamento por área ϕ_λ (Equação 1), segundo Soille (2004) é equivalente à intersecção (ou ínfimo) de todos os fechamentos com o elemento estruturante B , cujo tamanho em número de pixel é igual a λ , em que B_i é conectado e sua área é igual a λ .

$$\phi_\lambda = \bigwedge_i \{ \phi_{B_i}(f) \} \quad (1)$$

Assim o *top-hat* por fechamento de área suprime todas as estruturas escuras relevantes do fundo com área igual a

λ que após a diferença com a imagem original, são recuperadas e realçadas em relação aos demais objetos presentes na imagem. O sucesso da abordagem, segundo Soille (2004), deve-se ao fato de que não existe necessariamente uma correspondência de um-para-um entre o conhecimento sobre o que um objeto da imagem é e o que ele não é. Além disso, torna-se mais fácil muitas vezes remover objetos relevantes da imagem, do que tentar diretamente suprimir os irrelevantes.

Compensação radiométrica por *matching local*

As distorções radiométricas que afetam a medida dos valores de brilho em uma imagem, resultam numa distribuição incorreta dos valores de brilho em uma dada banda e, portanto, diferente do que se observa em relação à cena real (Richards 2012). A presença de sombras nas imagens pode ser considerada uma degradação que limita de certa forma, a interpretação dessas imagens. O pixel então acaba não representando a verdadeira característica do alvo a ele associado, comprometendo a qualidade por parte das imagens e impactando em aplicações que fazem o uso desses dados.

No processo de recuperar as informações afetadas pela presença de sombras, normalmente assume-se uma relação linear entre a radiação na área de sombra e na área que não foi afetada por este efeito, ou seja, em uma área iluminada. Essa relação na verdade é assumida devido a condição de iluminação entre essas regiões serem a mesma na aquisição da imagem (Shahtahmassebi *et al.* 2013). Assim a especificação de histograma, cujo termo mais conhecido em inglês é *matching* de histograma, pode ser uma, dentre as soluções para corrigir diferenças radiométricas entre áreas da imagem.

O trabalho é o mesmo que na equalização de histograma, o qual pode ser calculado pela Equação 2, na qual n_i representa o número de pixels com nível i , e N o total de pixels da imagem com L níveis de cinza.

$$y(i) = \frac{L-1}{N} \sum_{i=0}^{L-1} n_i \quad (2)$$

No entanto, no *matching*, o processo é feito tanto para imagem de entrada, quanto para a de referência especificada, que no caso do trabalho são representadas respectivamente por cada região de sombra rotulada e sua vizinhança, gerada por um *buffer* com gradiente por dilatação. Seja então, com base em Richards (2012), $z = f(x)$ a transformação que equaliza e mapeia o histograma original $h_i(x)$ para o histograma intermediário $h^*(z)$, e $z = g(y)$ a transformação de equalização do histograma especificado $h_0(y)$. A imagem resultante é obtida aplicando-se a inversa: $y = g^{-1}\{f(x)\}$. Isto representa um

mapeamento dos valores da imagem de entrada equalizada para seus valores mais próximos no histograma de referência, assumindo formas aproximadas, já que se tratam de valores discretos.

Metodologia

No trabalho, a área de estudo selecionada compreende a um trecho da cidade de São Paulo, cuja área urbana possui uma das mais altas taxas de aglomeração urbana da América do Sul, sendo a imagem utilizada portanto, composta em sua maioria por feições antrópicas como edifícios, viadutos, carros etc. A imagem empregada é do sensor pancromático do satélite WorldView-2, adquirida em maio de 2012. Trata-se de uma imagem de 50 cm de resolução espacial, com um grau de detalhamento elevado, resultando em grande quantidade de áreas de sombras de diferentes tamanhos. Um realce foi realizado através do ajuste global da intensidade média para 90 e desvio padrão de 30, para que fosse possível discernir os objetos da cena, já que as imagens pancromáticas apresentavam baixo contraste. Este foi o único recurso utilizado no pré-processamento da imagem, já que de acordo com Azevedo *et al.* (2013), o uso de outros recursos como a filtragem, não contribui para um aumento significativo da performance da detecção, uma vez que o fechamento da imagem corresponde a uma filtragem das estruturas da imagem. Na Figura 1 é possível observar dois recortes utilizados que possuem desde sombras de pequeno porte ocasionadas por veículos, até as de grande dimensão ocasionadas por edifícios.

A primeira etapa da metodologia consistiu em identificar as áreas de sombras na imagem. Na detecção, o baixo padrão de resposta em relação a sua vizinhança foi a principal característica utilizada para separar os pixels candidatos a sombras dos demais objetos presentes. A transformação *top-hat* por fechamento de área foi aplicada sobre a imagem para evidenciar padrões escuros. O critério de área foi imposto pelo fato da transformação não depender mais da forma do EE, como na maioria das operações morfológicas, já que sombras não possuem um padrão específico. O processo resulta em uma imagem cinzenta, tendo as sombras que estavam dentro do limiar de área e conectividade estabelecida, realçadas dos demais objetos. A binarização automática pelo método de Otsu (1979) foi aplicada e o resultado são os objetos de interesse, ou seja, as sombras em branco. Uma abertura por área foi ainda utilizada na imagem para remover alguns pixels não considerados como áreas significativas de sombra, sendo portanto, considerados como ruídos e eliminados das imagens.

A próxima etapa foi realizar a correção da informação radiométrica nas áreas detectadas a partir do *matching* de histograma local. O procedimento consistiu em combinar os histogramas de áreas vizinhas com os das regiões

identificadas e rotuladas como sombras. Para isto, o gradiente morfológico por dilatação foi utilizado para criar um *buffer* em cada região detectada. Os parâmetros estatísticos extraídos de cada *buffer* foram combinados com suas respectivas áreas de influência, de modo que ambas regiões ficassem com média e variância semelhantes. Trata-se de uma combinação local que altera somente os valores de brilho da região sombreada, procurando homogeneizar as diferenças radiométricas existentes.

Um processo de refinamento foi necessário para que efeitos decorrentes da penumbra não interferissem no resultado final. O *matching* foi recalculado sem a influência dessa área de transição entre sombras e regiões iluminadas e, uma suavização pela mediana foi aplicada para reduzir os ruídos nas áreas corrigidas e proporcionar descontinuidades de menor magnitude no momento de incorporar o resultado na imagem original.

O algoritmo foi implementado no *Matlab* que além do alto desempenho em operações com imagens, serve também como plataforma para a caixa de ferramentas de Morfologia Matemática *SDC Morphology Toolbox* utilizada na

deteccção. Contudo, houve restrições de memória do computador empregado quanto à dimensão da imagem a ser processada no *Matlab*, optando-se então por trabalhar com recortes de 300x300 pixels. A metodologia foi aplicada à um total de 16 recortes da imagem, número reduzido devido à complexidade na geração do *ground truth* necessários para avaliação do resultado, que será descrita na próxima seção. Em síntese, os procedimentos envolvidos na metodologia proposta podem ser entendidos pelo fluxograma apresentado na Figura 2.

Forma de Análise dos Resultados

Os resultados obtidos na deteção foram avaliados quantitativamente por meio dos índices de completeza e correção. Essa análise permite comparar o que foi detectado pelo algoritmo, como sendo áreas de sombras, com um dado de referência, também chamado de *Ground Truth* (GT). Os GT's foram gerados manualmente através da vetorização das áreas interpretadas pelo operador como sendo



Figura 1 – Recortes da imagem WorldView-2 pancromática da área urbana de São Paulo.

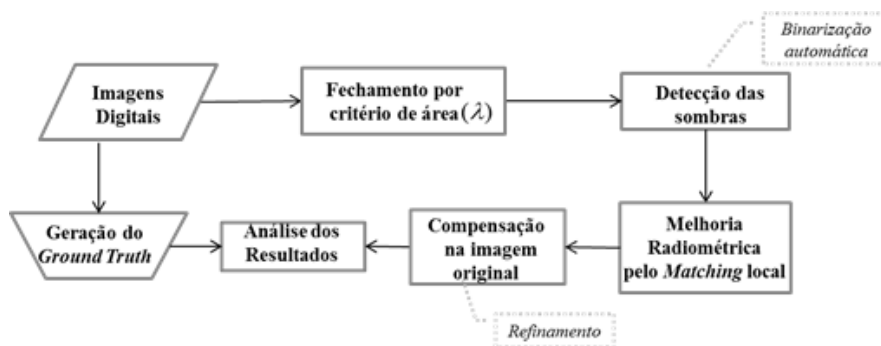


Figura 2 - Fluxograma das etapas envolvidas no desenvolvimento da metodologia.

de sombras. Dessa maneira, a Completeza na detecção de sombras, definida pela Equação 3, representa a porcentagem da área referente aos pixels corretamente identificados como sombras pelo método, presente na imagem processada (PI), dentro de um limite de tolerância da PI e tendo como base o GT da imagem analisada.

$$\text{Completeza} = \frac{\text{total de pixels sombra da PI coincidentes com o GT}}{\text{total de pixels sombra do GT}} \quad (3)$$

Já a Correção definida pela Equação 4, representa a porcentagem dos pixels detectados como sombra da PI e que são coincidentes com o GT, dentro do limite de tolerância estabelecido para ele. Assim, o índice da correção indica dentro do intervalo [0:1], qual o nível de acerto do método em rotular um pixel como sendo de sombra, tendo o valor 1 como ótimo.

$$\text{Correção} = \frac{\text{total de pixels de sombra da PI coincidentes com o GT}}{\text{total de pixels de sombra da PI}} \quad (4)$$

Resultados e discussões

A análise da metodologia proposta foi feita a partir dos recortes submetidos ao algoritmo, que realiza todo o processamento de forma semi-automática, sendo necessário apenas determinar o parâmetro de área para o processo da detecção. O critério de área utilizado para o fechamento da imagem foi de 30.000 pixels, cujo valor leva em conta a

alta resolução espacial das imagens e a dimensão dos objetos a serem detectados, que neste caso, devido à densidade urbana de São Paulo ser elevada, apresenta grande parte da superfície coberta por sombras. Além disso, a conectividade do EE analisa uma grande quantidade de pixels vizinhos e com um parâmetro inadequado, a transformação não faria efeito em sombras próximas que se encontram aglomeradas.

Na sequência, as áreas filtradas pelo fechamento são recuperadas pelo *top-hat*, que por apresentar um padrão aproximadamente bimodal, facilitou a binarização automática. Na Figura 3 é apresentado o resultado do *top-hat* (Figura3b) e o da binarização (Figura3c) para o recorte disposto na Figura3a.

A partir da análise visual do resultado da binarização (Figura 3c) observa-se que em geral, a maioria das áreas de sombras que se pode distinguir visualmente foram detectadas pelo algoritmo. Regiões menores que 5 pixels foram removidas por uma abertura de área, pois acabam sendo interpretadas como ruídos, já que não representam áreas significativas de sombras. Além disso, estes pixels podem apresentar problema na etapa de compenação, pois não carregam muitas informações sob eles resultando em valores saturados, que degradam a qualidade visual da imagem final.

Uma avaliação da qualidade da detecção foi feita, para verificar se o que foi detectado pelo algoritmo corresponde de fato as áreas de sombras presentes nas imagens de estudo e, quantificar a eficiência do método. Os indicadores da qualidade calculado para as 16 imagens são apresentados na Tabela 1. A Figura 4 apresenta o gráfico do comportamento dos índices, conforme sequência apresentada na Tabela 1.

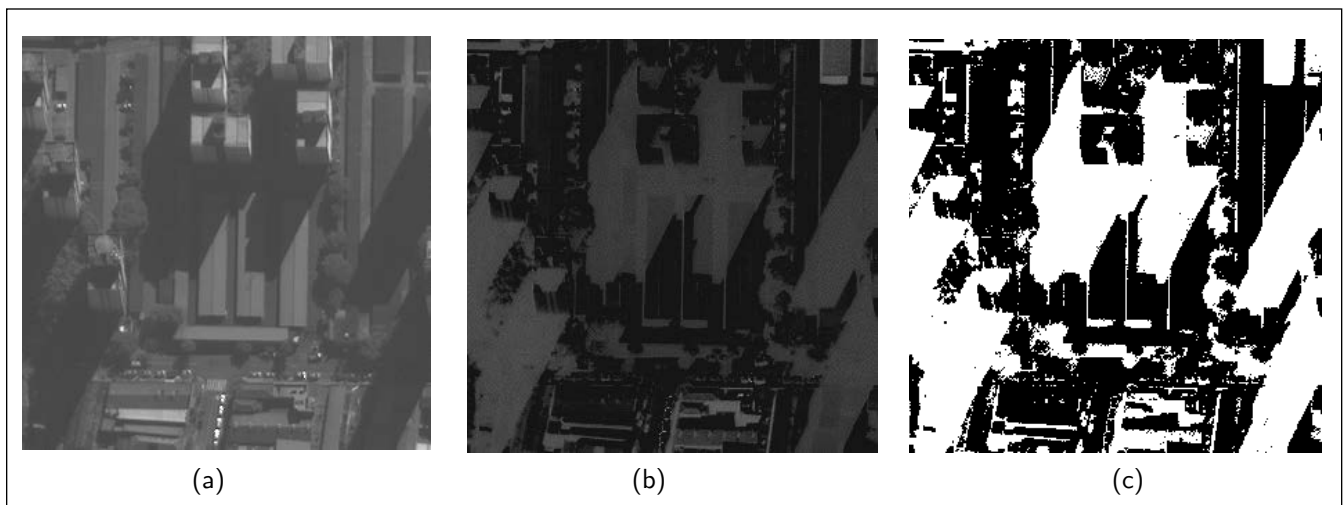


Figura 3 – Resultado daa detecção aplicada a um recorte.(a) Imagem Original; (b) Resultado do *Top-hat*; (c) Binarização automática por Otsu.

Tabela 1 - Índices calculados para a avaliação quantitativa da detecção.

Recortes	Completeza(%)	Correção(%)
SP-PAN_2_14	98,00	90,78
SP-PAN_2_18	92,38	90,93
SP-PAN_2_32	94,94	91,99
SP-PAN_2_39	98,59	86,95
SP-PAN_2_52	98,74	97,07
SP-PAN_3_50	95,60	93,36
SP-PAN_4_39	99,17	94,46
SP-PAN_6_27	98,26	94,13
SP-PAN_8_40	93,70	94,28
SP-PAN_11_40	94,79	96,53
SP-PAN_11_43	96,85	95,03
SP-PAN_13_49	96,29	95,10
SP-PAN_14_20	98,43	95,07
SP-PAN_36_39	86,32	91,24
SP-PAN_44_31	94,87	94,30
SP-PAN_50_30	96,14	94,04

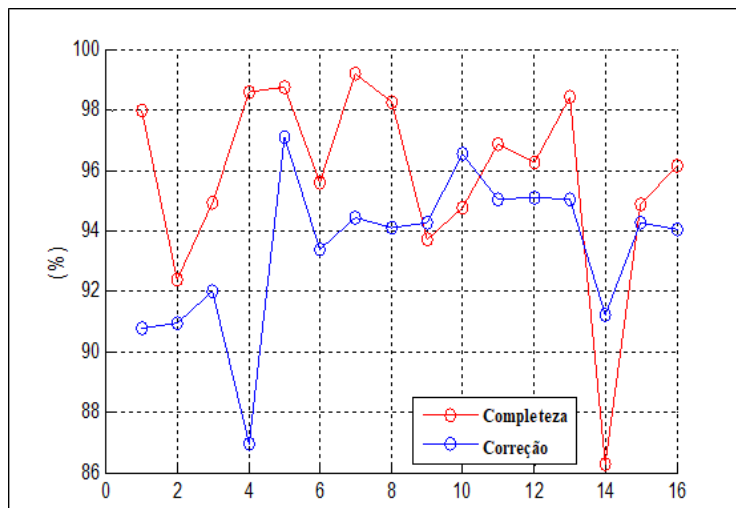


Figura 4 - Comportamento dos índices de completeza e de correção para os recortes conforme a Tabela 1.

Os índices indicam um bom desempenho do método para as imagens avaliadas, o que deve ser destacado, uma vez que são recortes de uma região urbana muito complexa, a qual contém sombras de tipos e tamanhos variados. Em geral, o método alcançou uma completeza média de 95,82% \pm 3,22 e correção de 93,45 \pm 2,54. Contudo, verifica-se duas imagens com comportamento discrepantes dos demais, como é o caso do recorte SP-PAN_36_39 com completeza abaixo de 90%. A identificação das possíveis causas foi realizada através da comparação da imagem detectada com

seu respectivo GT. O que se observou foi que o método teve dificuldade em detectar as sombras de uma área de vegetação densa. A vegetação é um dos problemas enfrentados pela maioria dos métodos presentes na literatura, pois devido a variação no dossel, sombras são formadas sobre suas próprias folhas, o que gera feições fragmentadas e dificulta a geração de um GT que represente com exatidão a cena real. Apesar do problema enfrentado, o algoritmo conseguiu identificar com 86% de completeza as sombras presentes, o que não pode ser considerado um resultado insatisfatório.

A compensação das áreas sombreadas foi então realizada, a partir do *matching* local entre as regiões identificadas como sombras e suas respectivas áreas vizinhas representadas pelo *buffer*. O algoritmo pôde determinar para cada pixel da região sombreada, um valor de ND da área de referência de modo a igualar ou aproximar os histogramas transformados. Devido à complexidade do cálculo da equalização para cada objeto da imagem e o *matching* para cada pixel, o tempo de execução ainda não foi otimizado. Tal otimização poderá ser realizada em trabalhos futuros,

Um refinamento foi realizado para remover discontinuidades entre as áreas compensadas que foram incorporadas à imagem original novamente. A mediana foi utilizada para reduzir esses efeitos na borda, além de contribuir para eliminar alguns ruídos nas regiões recuperadas. O resultado obtido é apresentado nas Figuras 5 e Figura 6, para

dois recortes, onde para efeito de comparação e avaliação, também foi apresentada a respectiva imagem original e a detectada utilizada como base para a compensação.

Analisando visualmente os resultados obtidos (Figura 5c e 6c) nota-se que foram evidenciados detalhes como carros, arruamentos, vegetação e telhados que haviam sido obstruídos pelas sombras, principalmente decorrente de edifícios. Em áreas com grande extensão de sombra, muitos são os objetos que estão ocultos e a área de referência gerada pode não ser representativa para todos eles, uma vez que considera apenas uma pequena região de influência ao redor. Apesar de ainda serem observadas discontinuidades causadas pela não homogeneização entre as áreas compensadas e a imagem original, esse efeito pode ser considerado reduzido principalmente devido ao refinamento realizado.

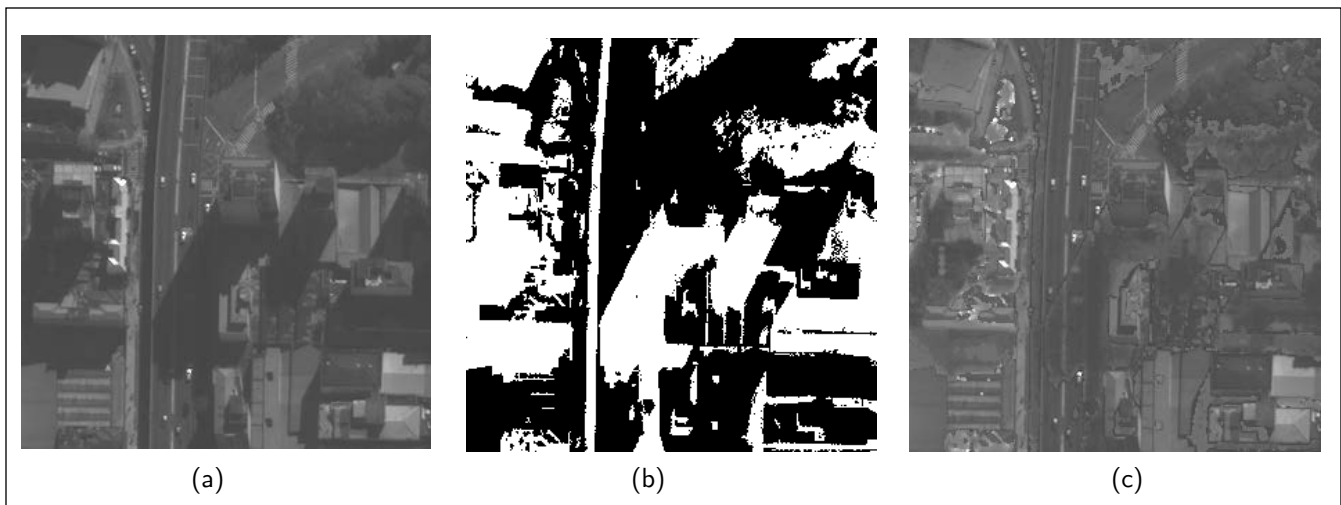


Figura 5 - Exemplos do resultado da metodologia. (a) Imagem original do recorte SP-PAN_2_18; (b) Resultado da detecção; (c) Imagem após a compensação e Refinamento.

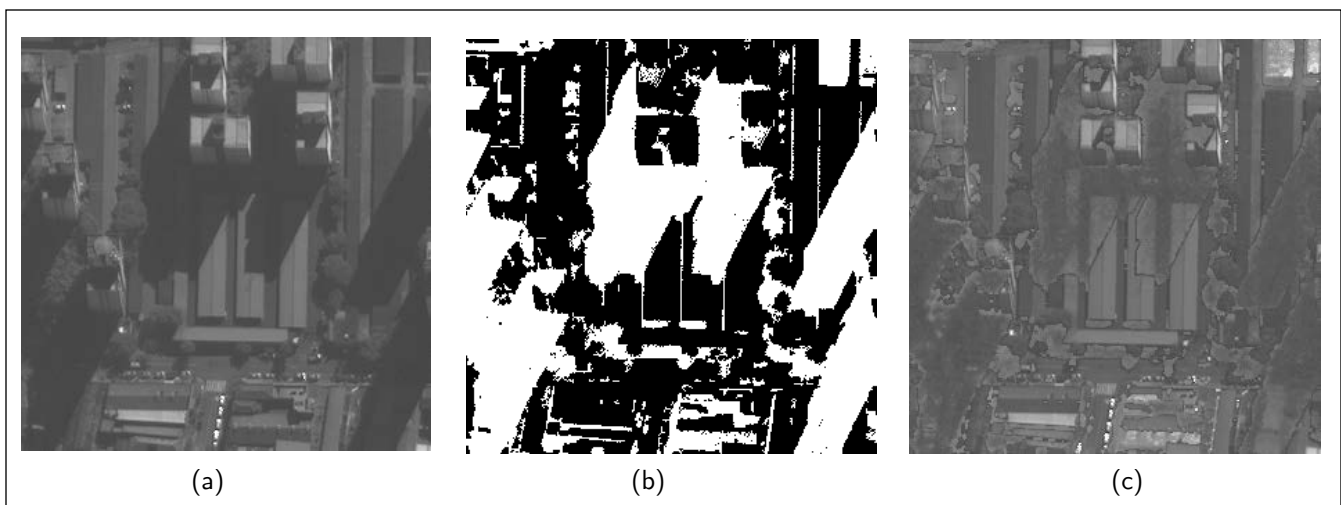


Figura 6 - Exemplos do resultado da metodologia. (a) Imagem original do recorte SP-PAN_3_50; (b) Resultado da detecção; (c) Imagem após a compensação e Refinamento.

Conclusões e Recomendações

A metodologia desenvolvida neste trabalho teve como principal objetivo a detecção e compensação das áreas de sombras em imagens com alta resolução espacial de uma área urbana densa, representada pela cidade de São Paulo. Os resultados preliminares mostraram que o método conseguiu identificar as sombras dos mais variados tipos e tamanhos, o que foi comprovado pelo índice de completude obtido, sendo maior que 90% para a maioria dos 16 recortes testados. Algumas falhas de detecção foram observadas, como a confusão em áreas de vegetação densa que o método acabou não separando, apesar do índice de completude ainda ser considerado satisfatório. Em trabalhos futuros, índices espectrais que permitem discriminar por exemplo, a vegetação dos demais objetos da cena, poderão ser utilizados para evitar quaisquer problemas de confusão e aumentar com isso, a eficácia do método. Outro fator importante na parte de detecção é a automação do critério de área, para que o algoritmo possa estabelecer o valor mais adequado para qualquer imagem de entrada, independente da sua resolução espacial e da dimensão dos objetos.

Quanto a melhoria da informação proporcionada, diferenças radiométricas foram minimizadas conforme a análise visual, comprovando a evidência de detalhes, como carros, arruamentos, vegetação e telhados oclusos pelos efeitos das sombras. Contudo, ainda está aquém do que se espera de uma imagem livre de sombras, mas acaba sendo coerente, já que a dificuldade da tarefa reflete na quantidade de trabalhos propostos para resolução do problema. Em trabalhos futuros, outras funções de transformações devem ser estudadas, uma vez que a equalização de histograma não permite o controle do nível de contraste aplicado, forçando frequências iguais para alvos com respostas diferentes e deixando um aspecto não natural ao resultado.

Uma maneira de avaliar os resultados da compensação também deve comparecer, já que imagens de referências são de difícil obtenção no caso orbital, sendo que são coletadas sempre no mesmo período de passagem e adquirir dados de outras fontes implica no aumento significativo dos custos. Dessa forma, estudos de como dispor desses dados ser realizados para verificar o quão verdadeiro é o valor de intensidade obtido pela técnica utilizada, em relação à resposta do alvo em condições normais de iluminação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio

a esta pesquisa na forma de uma bolsa e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio a pesquisa.

Referências

- Adeline, K. R. M., Chen, M., Briottet, X., Pang, S. K., & Paparoditis, N. (2013). Shadow Detection in Very High Spatial Resolution Aerial Images: Comparative Study. *ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, v. 80, p. 21-38.
- Azevedo, S. C., Pagamisse, A., Silva, E. A. & Cardim, G. P. (2013). Study of the Preprocessing Influence in the Accuracy of Semi-Automated Shadow Detection Approach. *JOURNAL OF COMMUNICATION AND COMPUTER*, v. 10, p. 1321-1328.
- Facon, J., (1996) *Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos*. Curitiba, PUC, 303 p.
- Gonzales, R.C. & Woods, R.E. (2010) *Processamento de Imagens Digitais*. Tradução: Cristina Yamagami e Leonardo Piamonte. São Paulo. 3ª Ed. PEAESON PRENTICE HALL. 624p
- Liu, W. & Yamazaki, F. (2012). Object-Based Shadow Extraction and Correction of High-Resolution Optical Satellite Images. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*. V. 5, n. 4, p. 1296 -1302.
- Meneses, P. R. & Almeida, T. (2012). *Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Brasília.
- Otsu, N. (1979). A threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS*, v. 9, n. 1, p. 62-69, 1979.
- Richards, A. J. (2012). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. 5 ed. Canberra, Austrália: SPRINGER-VERLAG. 494 p.
- Shahtahmassebi, A., Yang, N., Wang, K., Moore, N. & Shen, Z. (2013). Review of Shadow Detection and De-Shadowing Methods in Remote Sensing. *CHINESE GEOGRAPHICAL SCIENCE*, v. 23, n. 4, p. 403-420.
- Soille, P. (2004). *Morphological Image Analysis*. Berlin. SPRINGER-VERLAG. 391p.
- Wiedemann, C., Heipke, C., Mayer, H. & Jamet, O. (1998). Empirical evaluation of automatically extracted road axes. IN: *EMPIRICAL EVALUATION METHODS IN COMPUTER VISION*. IEEE Computer Society Press, pp. 172-187.
- Zhan, Q., Shi, W. & Xia, Y. (2005). Quantitative analysis of shadow effects in high-resolution images of urban areas. IN: *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, Vol 36.

