

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/2: 229-240
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

COMPARAÇÃO DE MODELOS DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PARA IMAGEM WORLDVIEW-2

Comparison of Atmospheric Correction Models for Worldview-2 Image

**Talita Calaca Costa dos Santos¹, Mauro Antonio Homem Antunes²,
José Carlos Sícoli Seoane¹, Gustavo Mota de Sousa³**

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Instituto de Geociências – Departamento de Geologia

Av. Athos da Silveira, 274 (prédio do CCMN), bloco G, Campus Ilha do Fundão,
CEP 21.949-900, Rio de Janeiro, RJ RJ, Brasil
talita.calaca@gmail.com; cainho@geologia.ufrj.br

²Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ

Instituto de Tecnologia – Departamento de Engenharia

BR 465, Km 7, Seropédica – RJ RJ, Brasil
mauroantunes@ufrj.br

³Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ

Instituto de Agronomia – Departamento de Geociências

BR 465, Km 7, Seropédica – RJ, Brasil
gustavoms@ufrj.br

*Recebido em 4 de Setembro, 2016/ Aceito em 7 de Dezembro, 2016
Received on September 4, 2016/ Accepted on December 7, 2016*

RESUMO

Imagens obtidas remotamente no espectro solar são afetadas pela atmosfera devido ao espalhamento e absorção, conduzindo a problemas na extração de informações da superfície da Terra a partir destas imagens. A correção atmosférica por modelos de transferência radiativa é uma forma de eliminar ou pelo menos minimizar esses problemas. O objetivo deste trabalho é avaliar a correção atmosférica da imagem obtida pelo sensor multiespectral a bordo do satélite WorldView-2 através do método *DOS*, do modelo *AtmCor4WV2* adaptado do modelo *6S* e do módulo *ATCOR2*. Dados da função de resposta e de calibração do sensor foram implementados nos modelos *AtmCor4WV2* e *ATCOR2* e uma imagem multiespectral foi corrigida para os efeitos da atmosfera. A correção atmosférica pelo *Atmcor4WV2*, *ATCOR2* e *DOS* foi avaliada comparando-se a imagem sem correção com a corrigida e através de amostras de três alvos diferentes e comparando-se a reflectância da superfície com a reflectância aparente (reflectância a nível satélite). Os resultados mostraram que os valores de reflectância calculados pelo módulo *ATCOR2* foram superestimados quando a reflectância aparente era alta. O método *DOS* e o *Atmcor4WV2* apresentaram resultados com curvas espectrais que se assemelham à assinatura espectral de cada alvo. Concluiu-se que a correção atmosférica é necessária, especialmente quando as imagens serão usadas para estimar parâmetros de superfície que estão relacionados com as características espectrais dos alvos.

Palavras chaves: Reflectância da Superfície, Comportamento Espectral, *DOS*, *AtmCor4WV2*, *ATCOR*, Ambiente Costeiro.

ABSTRACT

Remotely sensed images using the solar spectrum are affected by the atmosphere through scattering and absorption, leading to problems in extracting information from the Earth's surface images. Atmospheric correction by radiative transfer models are a way to eliminate or at least minimize these problems. The objective of this paper is to evaluate the atmospheric correction through the DOS model, the Atmcor4WV2 model adapted from the 6S model and the ATCOR module for an image from the Multispectral sensor onboard of the WorldView-2 satellite. The sensor's response function and calibration data have been implemented in the Atmcor4WV2 and ATCOR2 models and a multispectral image was corrected for the effects of the atmosphere. The atmospheric correction by the Atmcor4WV2, ATCOR2 and DOS were evaluated by comparing the corrected with the non-corrected image by collecting samples from the raw image and those corrected by the three different methods and comparing the surface reflectance with the apparent reflectance (reflectance at satellite level). Results show that the surface reflectance values calculated by the ATCOR2 were overestimated when apparent reflectance was high. The DOS and AtmCor4WV2 and methods yielded results with spectral curves that resemble the spectral signatures of the analyzed targets. We conclude that atmospheric correction is necessary, especially when the images will be used to estimate surface parameters that are related to the spectral characteristics of the targets.

Keywords: Surface Reflectance, Spectral Behavior, DOS, AtmCor4WV2, ATCOR, Coastal Environment.

1. INTRODUÇÃO

Imagens de satélites são obtidas a uma grande distância da superfície da terrestre. Consequentemente, há um percurso atmosférico substancial que a radiação eletromagnética precisa atravessar antes de chegar ao sensor. Dependendo do comprimento de onda e das condições atmosféricas, a radiação que atinge o sensor pode sofrer modificações.

De maneira geral, a atmosfera é um dos principais causadores de degradações nas imagens originais, muitas vezes comprometendo a análise e a interpretação destas. De acordo com Fonseca e Fernandes (2004), a atmosfera afeta as imagens por absorção e por dispersão. A absorção faz com que parte da energia refletida ou emitida pelos objetos não atinja os sensores. A dispersão altera a direção de propagação da radiação, podendo ser expressa de duas formas: (i) parte da energia proveniente dos objetos não atinge o sensor e (ii) parte da radiação solar é dispersa na atmosfera e encaminhada para seu campo de visão.

Os principais efeitos da atmosfera sobre as imagens de sensoriamento remoto são a redução do contraste entre os alvos, a reduzida possibilidade de detecção de alvos muito pequenos, e a não separação de alvos que apresentem reflectâncias muito próximas (ROSA, 2009).

A intensidade da influência da atmosfera depende do comprimento de onda, variando assim de banda para banda e a correção dos efeitos da atmosfera sobre a imagem de satélite pode ser feita

a partir de modelos matemáticos. Existem diversos métodos aplicados na correção atmosférica tanto para imagens de satélites multiespectrais quanto hiperespectrais, neste trabalho serão apresentados três métodos de correção atmosférica mais utilizados que serão aplicados em uma imagem do satélite multiespectral WorldView-2: o método *DOS*, o módulo *ATCOR2* e o modelo *AtmCor4WV2*.

O método empírico *Dark Object Subtraction - DOS* (CHAVEZ JR., 1988; CHAVEZ, 1996) consiste na correção do espalhamento atmosférico no qual a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir dos números digitais (ND) da imagem de satélite, sendo ignorada a absorção atmosférica. Neste método assume-se que há uma grande probabilidade de existir alvos (pixels) escuros nas imagens, como sombras resultantes da topografia ou nuvens, os quais deveriam apresentar um ND igual a zero; porém devido a dispersão atmosférica o valor de ND nestas áreas é diferente de zero. Esse valor representa a quantidade de ND que deve ser subtraída de cada banda espectral da imagem. Utilizando um histograma da imagem é possível selecionar o valor de ND que será subtraído de cada banda da imagem. Esta metodologia é baseada em informações coletadas na própria imagem, assim não há necessidade de se inserir parâmetros sobre as condições atmosféricas do momento da captura da imagem (CHAVEZ, 1988; SANCHES *et al.*, 2011).

O segundo método foi realizado através do

ATCOR2 (ATmospheric CORrection), um módulo do software *ERDAS IMAGINE®* e que utiliza o código *MODTRAN-4 (MODerate Resolution Atmospheric TRANsmittance Algorithm)* (Richter & Schläpfer, 2012). O *ATCOR* é um algoritmo desenvolvido que suporta os principais sensores comerciais de pequeno e médio *FOV (field of view, campo de visada)*, como Landsat TM, SPOT, QuickBird ou RapidEye, desde que sejam fornecidos as características espectrais e os dados de calibração radiométrica de cada sensor além das características atmosféricas no momento da captura da imagem (RICHTER & SCHLÄPFER, 2012).

O terceiro método utilizado consistiu na aplicação do *AtmCor4WV2*, modelo que foi adaptado a partir do modelo *6S* para utilização em imagens do satélite WorldView-2. O modelo *6S* é fundamentado na transferência radiativa, ele considera as características atmosféricas no momento de obtenção da imagem para o cálculo dos fluxos necessários para a obtenção da reflectância bidirecional da superfície (ANTUNES *et al.*, 2012).

O modelo *6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum)* foi desenvolvido por Vermote *et al.* (1997) e originalmente implementado para a simulação da radiância que chega nos sensores em bandas dentro do espectro solar, entre 250 nm a 4000 nm, podendo assim ser utilizado para estabelecer as características de sensores. A partir de uma reflectância do alvo e da irradiância direta e difusa que chegam à superfície obtém-se a radiância que sai do alvo na direção do sensor. Através da transferência radiativa é obtida a radiância que chega ao sensor e assim pode-se também obter a reflectância aparente com base na irradiância que chega ao topo da atmosfera. O modelo *6S* em sua implementação original permite também simular a reflectância da superfície para diferentes alvos e, a partir deste valor, obter a reflectância aparente e a radiância que chega ao nível do sensor.

A utilização do *6S* no sentido inverso consiste em utilizar a radiância que chega ao sensor para o cálculo da reflectância aparente e aplicar nesta a transmitância total e gasosa da superfície até o sensor e do fluxo solar do topo da atmosfera até a superfície. Desta maneira a reflectância bidirecional (RB) da superfície é obtida considerando-se os efeitos atmosféricos de absorção e espalhamento pelos gases e aerossóis constituintes da atmosfera.

O objetivo deste artigo é avaliar e comparar a correção atmosférica através do modelo *AtmCor4WV2*, *ATCOR2* e *DOS* para imagens do sensor Multiespectral a bordo do satélite WorldView-2. Para isso foram coletados os valores de reflectância da superfície (das imagens corrigidas pelo *AtmCor4WV2*, *ATCOR2* e *DOS*) e da reflectância aparente (reflectância ao nível do satélite) de três amostras de alvo, sendo posteriormente estes valores comparados com a resposta esperada dos alvos conforme publicado na literatura.

2.MATERIAIS E MÉTODOS

A imagem utilizada foi a do sensor Multiespectral do satélite WorldView-2 cedida pela DigitalGlobe, com data de 23/12/2009 da região costeira de Porto Seguro, Bahia (BA) (Figura 1). O Quadro 1 apresenta as especificações do satélite WorldView-2.

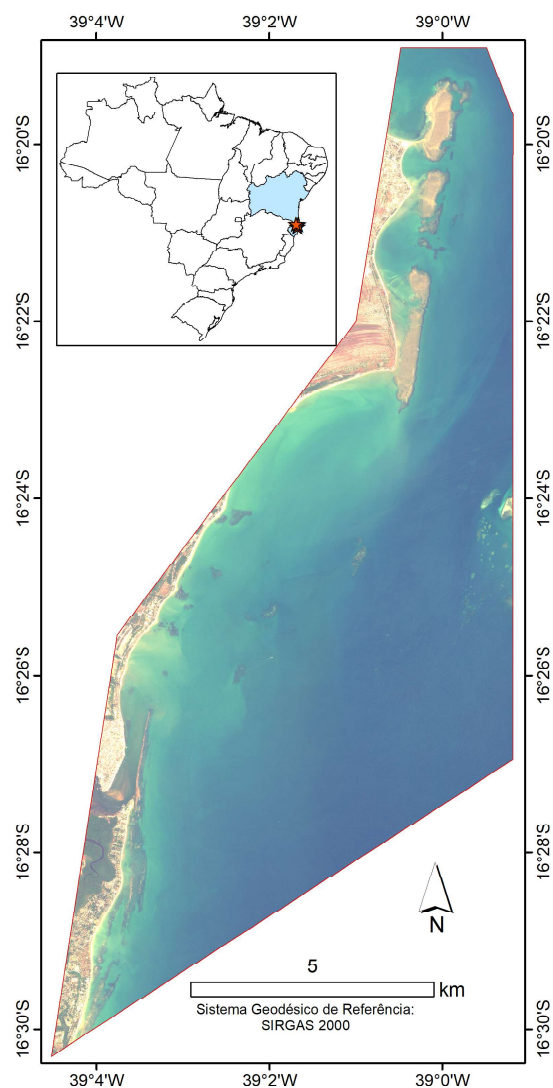


Fig. 1- Imagem bruta do satélite WorldView-2 para a região de estudo, composição 532.

Com a imagem utilizada foram feitas seis comparações:

- Produto 1: resultante da imagem bruta (sem correção e com os valores de números digitais corrigidos para reflectância);
- Produto 2: resultante da correção atmosférica pelo método *DOS* (pixel escuro);
- Produtos 3 e 4: resultante da correção atmosférica pelo módulo *ATCOR2* aplicando 18 km e 59 km de visibilidade respectivamente;

Produtos 5 e 6: resultante da correção atmosférica pelo método *6S* (modelo *AtmCor4WV2*) aplicando 18 km e 59 km de visibilidade respectivamente. O fluxograma resumido da metodologia está representado na Figura 2 e será detalhado a seguir.

Produtos 5 e 6: resultante da correção atmosférica pelo método *6S* (modelo *AtmCor4WV2*) aplicando 18 km e 59 km de visibilidade respectivamente. O fluxograma resumido da metodologia está representado na Figura 2 e será detalhado a seguir.

Quadro 1: Especificações técnicas do satélite WorldView-2

	WorldView-2
Instituição Responsável	Digital Globe
Lançamento	08/10/2009
Local de lançamento	Base aérea de Vandenberg, Califórnia, EUA
Altitude	770 km
Órbita	Heliossíncrona
Tempo de duração da órbita	100 minutos
Bandas do sensor	Pancromática, Vermelho, Vermelho Borda, Azul, Azul Costeiro, Verde, Amarelo, Infravermelho próximo-1 e Infravermelho próximo-2
Resolução espacial	Pancromático: 0,46 m (nadir) / 0,52 m a 20° off-nadir Multiespectral: 1,84 m (nadir) / 2,08 m GSD a 20° off-nadir
Resolução espectral	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor Pancromático: Banda Pancromática: 450-800 nm • Sensor Multiespectral: Azul Costeiro (banda 1): 400-450 nm Azul (banda 2): 450-510 nm Verde (banda 3): 510 - 580 nm Amarelo (banda 4): 585 - 625 nm Vermelho (banda 5): 630 - 690 nm Vermelho Borda (banda 6): 705 - 745 nm Infravermelho próximo 1 (banda 7): 770 - 895 nm Infravermelho próximo 2 (banda 8): 860 - 1040 nm
Resolução Radiométrica	11 bits por pixels

Fonte: Digital Globe, 2013.

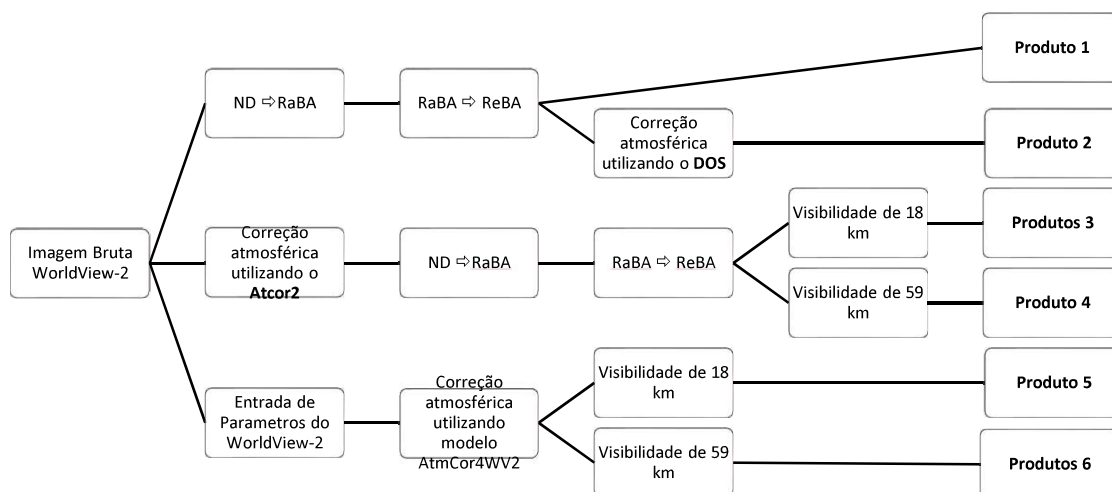


Fig. 2 - Fluxograma as etapas do pré-processamento, onde *ND* é Número Digital, *RaBA* é a Radiânciam Bidirecional Aparente e *ReBA* é a Reflectância Bidirecional Aparente

2.1 Conversão de Número Digital para Reflectância Bidirecional

Antes de realizar a correção atmosférica em uma imagem é necessário realizar conversões a fim de tornar os dados mais adequados para o mapeamento. A primeira delas, de acordo com o Ponzoni & Shimabukuro (2009), é a conversão dos números digitais (ND) das imagens para valores de parâmetros físicos como radiância e posteriormente, reflectância. Estas conversões foram realizadas utilizando o *software ENVI 5.0* (ENVI, 2000).

Para converter os NDs da imagem em Radiância Bidirecional Aparente, a empresa Digital Globe (2010), fornecedora das imagens do satélite recomenda a utilização da Equação 1. Essa conversão permite a caracterização espectral dos objetos e também a realização de operações aritméticas utilizando dados de imagens de diferentes bandas espectrais, para um mesmo sensor ou entre diferentes sensores, uma vez que os novos “NDs” representam um parâmetro físico apresentado em uma mesma escala (PONZONI & SHIMABUKURO, 2009).

$$L_{\lambda_{\text{Pixel,Banda}}} = \frac{K_{\text{Banda}} \cdot q_{\text{Pixel,Banda}}}{\Delta\lambda_{\text{Banda}}} \quad (1)$$

onde:

$L_{\lambda_{\text{Pixel,Banda}}}$ = Radiância espectral do pixel [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$];

K_{Banda} = Fator de calibração radiométrica absoluta de uma banda particular [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{count}^{-1}$];

$q_{\text{Pixel,Banda}}$ = é o ND do pixel da imagem radiometricamente corrigida (count);

$\Delta\lambda_{\text{Banda}}$ = *effective bandwidth* [μm] de uma banda.

O fator de calibração e o *effective bandwidth* estão disponíveis no metadados do arquivo da imagem.

Com os dados devidamente convertidos pode-se agora compará-los entre si entre diferentes bandas e sensores. De acordo com Ponzoni & Shimabukuro (2009) a radiância é um parâmetro radiométrico dependente da intensidade de radiação incidente sobre o alvo, com isso ela não é o parâmetro mais apropriado para avaliações das propriedades espectrais dos objetos-alvo. Sendo assim, é necessário convertê-la a Reflectância Bidirecional Aparente (ReBA).

De acordo com Rosa (2009), a reflectância é uma característica intrínseca dos alvos, pois é devido a diferenças de reflectância entre objetos é que podemos separá-los.

Para o cálculo da Reflectância Bidirecional Aparente deve-se corrigir a irradiância no topo da atmosfera de uma dada banda para a distância Terra-Sol e o ângulo zenital solar. Com isso a equação para a transformação de Radiância Bidirecional Aparente para Reflectância Bidirecional aparente torna-se (Equação 2):

$$\rho_{\lambda_{\text{Pixel,Banda}}} = \frac{L_{\lambda_{\text{Pixel,Banda}}} \cdot d_{\text{TS}}^2 \cdot \pi}{E_{\text{sun}}_{\lambda_{\text{Banda}}} \cdot \cos(\theta_s)} \quad (2)$$

onde:

$\rho_{\lambda_{\text{Pixel,Banda}}}$ = Reflectância Bidirecional Aparente;

$L_{\lambda_{\text{Pixel,Banda}}}$ = Radiância Bidirecional Aparente;

d_{TS}^2 = distância Terra-Sol;

π = 3,141592;

$E_{\text{sun}}_{\lambda_{\text{Banda}}}$ = Irradiância média do Sol no topo da atmosfera para cada banda e na distância média Terra-Sol.

$\text{Cos}(\theta_s)$ = Cosseno do ângulo zenital solar.

A Equação 2 foi aplicada para cada banda da imagem e posteriormente comparada com os métodos de correção atmosférica.

2.2 Correção atmosférica DOS

Um método amplamente utilizado para correção dos efeitos atmosféricos, denomina-se *DOS (Dark Object Subtraction)*. Neste método desenvolvido por Chavez (1988) onde somente o processo de espalhamento atmosférico é corrigido na imagem.

Para a aplicação deste método utilizou-se a imagem com números digitais convertidos em reflectância aparente (PONZONI & SHIMABUKURO, 2009). Utilizando o *software ENVI 5.0*, o programa gerou o histograma de todas as bandas da imagem que continham informações dos valores mínimos e máximos de reflectância para cada banda; a partir disso, os valores mínimos foram subtraídos de cada banda na imagem.

2.3 Correção atmosférica utilizando o módulo ATCOR2

O *ATCOR2* converte os valores digitais para radiância espectral no sensor – com

calibração através da Equação 3, uma relação linear descrita entre a intensidade de luz registrada em cada canal espectral do sensor, ou números digitais (DN), e a radiância no sensor, sendo realizada para cada banda – e então para reflectância aparente a fim de realizar a remoção dos efeitos da atmosfera.

$$L_{\lambda} = c_0 + c_1 * DN_{\lambda} \quad (3)$$

onde, L_{λ} é a Radiância espectral na abertura do sensor em $W \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ e DN representa os valores de nível de cinza em cada banda (λ). Os valores de c_0 (“bias” ou “offset”) e c_1 (“gain”) são os coeficientes de calibração radiométrica. Esses valores são obtidos através dos dados contidos nos metadados das imagens, e variam de acordo com o sensor utilizado e seu tempo de vida (RICHTER & SCHLÄPFER, 2012).

Para o WorldView-2, o arquivo de calibração disponível possui valores de c_0 igual a zero e o c_1 é calculado como (Equação 4):

$$c_1 = \frac{0,1 \text{ AbsCalFactor}}{FWHM} \quad (4)$$

onde o *AbsCalFactor* é o fator de calibração absoluta e *FWHM* é a largura da banda onde a sensibilidade do sensor é acima da metade da sensibilidade máxima (chamado de *effective Bandwidth* nos metadados da imagem), os quais são obtidos através dos dados contidos nos metadados das imagens.

Entretanto, além do algoritmo para a correção atmosférica específico para o WorldView-2 (Equação 3), é necessário inserir os seguintes parâmetros de entrada: data de aquisição da imagem, número de bandas, tipo de sensor, arquivo de calibração do sensor, ângulo de azimute solar, ângulo zenital solar, ângulo azimutal do satélite, ângulo de visada do satélite, modelo atmosférico, elevação média da cena e visibilidade da cena, conforme o Quadro 2.

O *ATCOR2* reescala o resultado de 0 a 1 (adimensional) da reflectância de superfície, para 0 a 65535, portanto, dividiu-se o valor de reflectância do pixel por 65535 (para ter a reflectância de 0 a 1) (SOARES *et al.*, 2015) para facilitar e padronizar a leitura dos dados com as outras correções realizadas nos outros modelos.

Quadro 2: Dados para o módulo *ATCOR* extraídos dos metadados do WorldView-2 (*), inferidos pelo usuário (**), e calculados pelo *ATCOR* (***)

Parâmetros	Valores de entrada
Data *	23/12/2009
Zênite solar (°)*	24,8
Azimute solar (°)*	110,7
Ângulo de incidência (°)*	15,2
Azimute do satélite (°)*	163,1 (sensor Multiespectral) / 162,9 (sensor Pancromático)
Modelo de atmosfera **	Tropical marítimo
Modelo de aerossóis **	Marítimo
Elevação média (km)**	0,01
Visibilidade (km)	18** e 59***

2.4 Correção atmosférica utilizando o modelo *AtmCor4WV2* (método 6S)

Para corrigir a imagem utilizando o método 6S, foi necessário a adaptação do modelo *AtmCor4WV2*, que possui atributos específicos para imagens orbitais originadas do satélite WorldView-2. Os parâmetros utilizados na correção estão demonstrados no Quadro 3.

Pelo modelo *AtmCor4WV2* foi necessário transformar a imagem da extensão TIF para RAW, sendo utilizado para tal o programa *Spring 5.2.6*. Além da imagem em RAW, o modelo requisita a elaboração de um arquivo de *input*, com os parâmetros listados no Quadro 2 e respectivos metadados, além de, um arquivo texto informando quais são os arquivos de entrada e saída. A visibilidade de 59 km foi estimada no programa *ATCOR2* e utilizada no *AtmCor4WV2*, entretanto com o objetivo de testar outros modelos utilizou-se também a visibilidade de 18 km que foi indicada mediante testes realizados na imagem.

Uma vez executado o *AtmCor4WV2*, foi gerada uma imagem de saída corrigida para os efeitos da atmosfera, com 16 bits e já com a informação de reflectância de superfície de cada pixel. Posteriormente, foi necessário dividir este valor por 10.000 para facilitar a leitura e comparação com os outros dados, e também, converter a imagem corrigida para TIF, para possibilitar análises subsequentes.

Quadro 3: Parâmetros de entrada no modelo para a correção atmosférica

Parâmetros	Valores de entrada
Tipo de sensor	Multiespectral
Mês, dia, hora decimal, longitude decimal, latitude decimal	12, 23, 12.898656, -39.07533074, -16.31519962
Tipo de modelo de atmosfera gasosa	1 (Tropical)
Tipo de modelo de aerossóis	2 (Marítimo)
Visibilidade em km (concentração de aerossóis)	18 e 59 km
Altitude média do alvo em km	0,005
Marcador para a banda do sensor	42 a 49
Abscalfactor, Deltaband, Esunband para o WorldView-2	(Valores diferentes para cada banda)
Número de pixels da imagem	49912246

2.5 Comparação dos resultados

Para a etapa de avaliação dos métodos aplicados foram escolhidas três classes de comparação na imagem: a vegetação, a água do mar e a areia.

Para a escolha dos pixels foram gerados 3 polígonos na região da imagem que possui vegetação, com 5 x 5 pixels (10m x 10m), totalizando 75 pixels e 300m². O mesmo ocorreu para as regiões da imagem com água e areia.

Os shapefiles destas classes foram analisados no programa QGIS 2.14 (QGIS, 2014) utilizando a ferramenta Temporal/Spectral Profile. Com esta ferramenta foi possível gerar uma média de reflectância dos 3 polígonos para cada classe (vegetação, água e areia). Posteriormente foram gerados gráficos de reflectância para cada uma destas classes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a imagem sem correção (Produto 1-Figura 3a), a imagem com correção atmosférica DOS (Produto 2-Figura 3b), a imagem com correção atmosférica ATCOR2 59km (Produto 4-Figura 3c) e a imagem com correção atmosférica AtmCor4WV2 59km (Produto 6-Figura 3d) com composição colorida 532 (vermelho, verde, azul).

Para comparar os métodos foram gerados

gráficos de reflectância para cada uma das três classes identificadas na imagem: vegetação, água do mar e areia, posteriormente os dados foram comparados para cada método de correção atmosférica.

A curva da vegetação foi extraída de uma região da imagem caracterizada por floresta de mangue. Na Figura 4 estão representadas as curvas da resposta espectral da vegetação de mangue.

As seis curvas da vegetação apresentaram comportamentos característicos de vegetação (NOVO, 1992; ROSA, 2009). As curvas caracterizam-se por um pequeno pico no comprimento de onda do verde (546 nm), onde nesta região os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral, principalmente a clorofila; seguido por um decaimento até o comprimento de onda do vermelho (659 nm) onde ocorre absorção pelos pigmentos. No método DOS e na imagem bruta, ocorre um aumento da reflectância na região do infravermelho (700 – 908 nm), com um pequeno decaimento do infravermelho próximo 1 (831 nm) para o infravermelho próximo 2 (908 nm). E nos métodos AtmCor4WV2 e ATCOR, ocorre um comportamento oposto, em que há um pequeno aumento de reflectância do infravermelho próximo 1 (831 nm) para o infravermelho próximo 2 (908 nm).

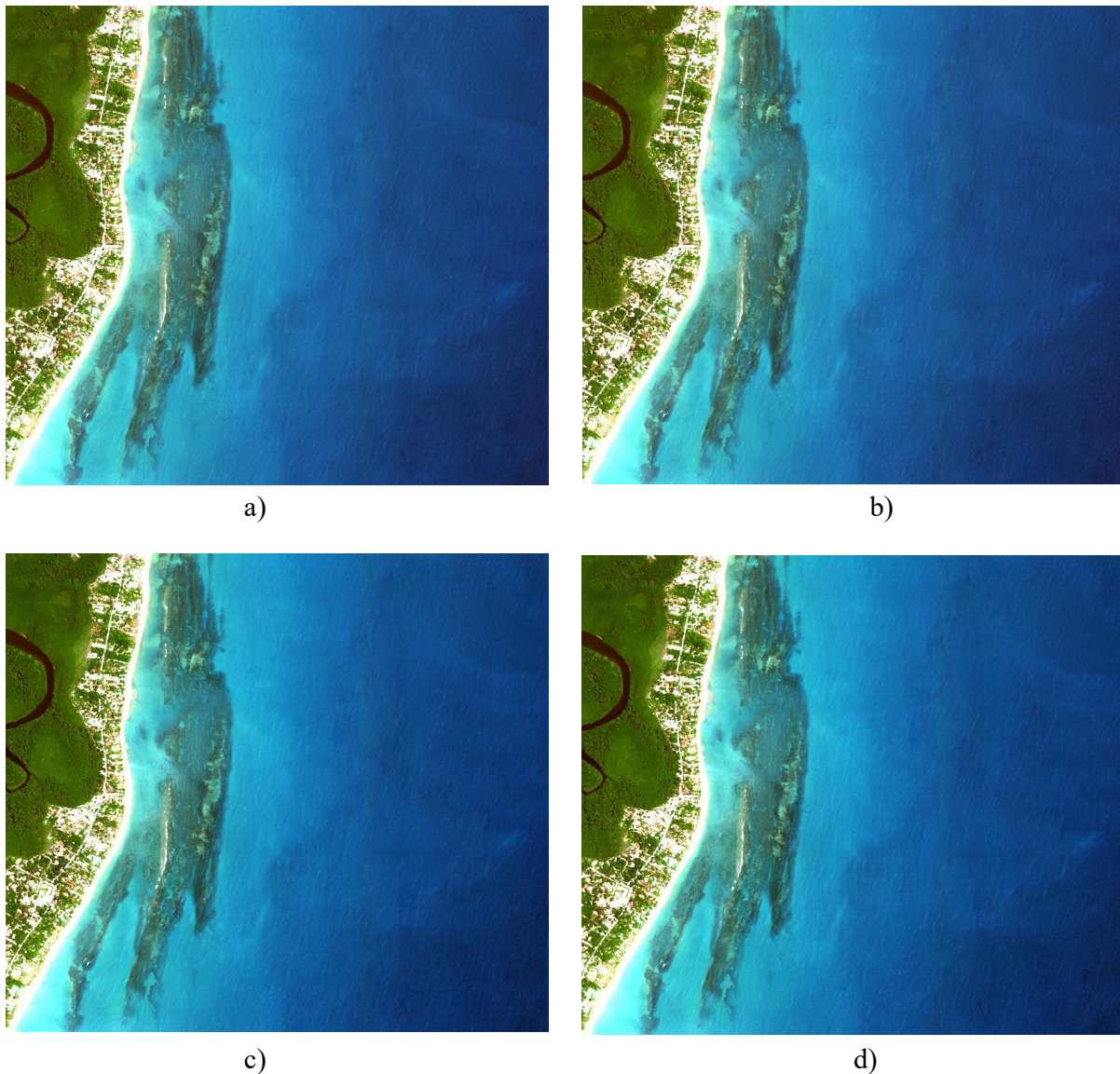


Fig. 3 - Cena na composição colorida 532 com o mesmo nível de contraste para a imagem sem correção (Produto 1) (a), imagem corrigida com DOS (Produto 2) (b), imagem corrigida com o ATCOR2 59km (Produto 4) (c) e a imagem corrigida com AtmCor4WV2 59km (Produto 6) (d); (todas as imagens apresentam o mesmo nível de contraste).

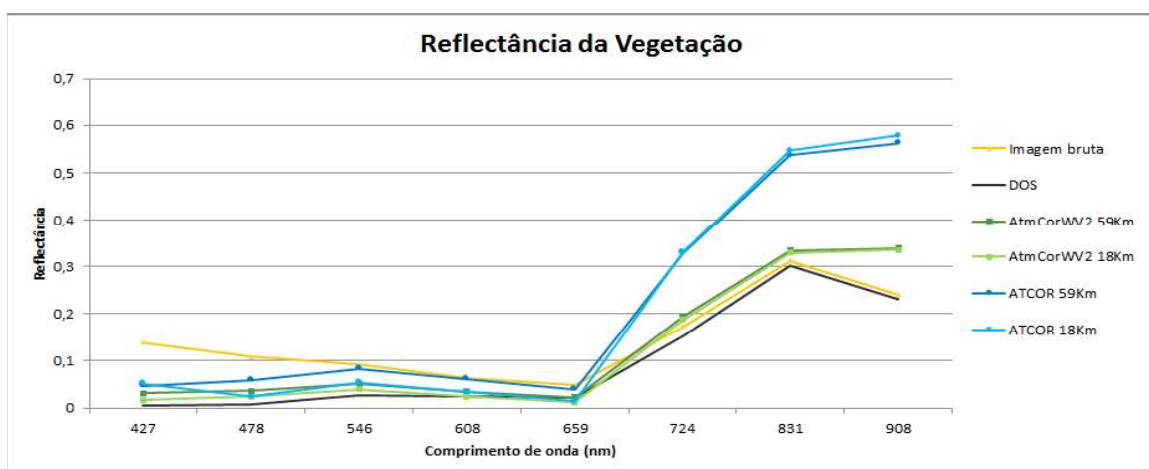


Fig. 4 - Valores da Reflectância Bidirecional (em fração, de 0 a 1) versus o comprimento de onda central da banda obtidos para a vegetação na imagem sem correção atmosférica e nas imagens corrigidas com DOS, ATCOR2 e AtmCor4WV2 para a imagem WorldView-2 na região da baía de Porto Seguro, BA, Brasil.

Em geral, no comprimento de onda visível houve uma diminuição da reflectância em relação à imagem não corrigida, devido à predominância do espalhamento (principalmente o Rayleigh) em relação à absorção nesta faixa do espectro. No infravermelho próximo há uma predominância da absorção, principalmente pelo vapor de água, portanto a correção atmosférica levou a um aumento da reflectância.

- De acordo com Novo (1992), a reflectância da vegetação pode ser compreendida entre 400 a 2600nm podendo ser dividida em três áreas: a região do visível (400 a 700nm), do infravermelho próximo (700 a 1300nm) e a região do infravermelho médio (1300 a 2600 nm): Até 700 nm (região do visível) a reflectância é baixa (menor que 20%), decorrente da forte absorção da radiação pelos pigmentos, principalmente a clorofila (NOVO, 1992; ROSA, 2009). Este comportamento foi observado claramente nos métodos AtmCor4WV2, DOS.
- De 700 a 1300 nm, a reflectância passa para valores próximos a 40%, o que está relacionado à estrutura celular da folha, onde ocorrem múltiplas reflexões e refrações, associadas a descontinuidades de índices de refrações (NOVO, 1992; ROSA, 2009). Na região do infravermelho próximo (700 nm – 1300 nm) existe uma absorção pequena da Radiação Eletromagnética (REM) e considerável espalhamento interno na folha (JENSEN, 2009). A reflectância espectral de folhas nesta região do espectro é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como a disponibilidade de água por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região. Este comportamento foi observado claramente nos métodos AtmCor4WV2, DOS e na Imagem não corrigida.
- De 1300 a 2600 nm a reflectância é dominada pela absorção da água presente no mesófilo foliar, mas esta faixa não está presente nas bandas do WorldView-2

A diferença entre o ATCOR e os demais métodos no infravermelho próximo foi consideravelmente grande, o que levanta questões sobre a correção atmosférica do ATCOR. Por

exemplo, para a banda centrada no comprimento de onda de 908nm a correção pelo ATCOR com visibilidade de 18 km levou a reflectância de 0,2396 para 0,5782. No entanto, a correção da absorção pela água ao longo da atmosfera entre a superfície e o sensor não é suficiente para explicar um aumento da reflectância da ordem de 0,3386. No caso do AtmCor4WV2 para este comprimento de onda o aumento causado pela correção foi de 0,0957.

De acordo com Novo (1992), o comportamento espectral da água é função das propriedades óticas da água pura e de outras substâncias nela dissolvidas e em suspensão como também microrganismos fotossintetizantes. Em geral, a maior reflectância deste alvo observada na faixa espectral do azul (400 nm), decrescendo gradualmente na direção do infravermelho até se aproximar de zero. De acordo com Pegorari (2001), a assinatura espectral da água líquida apresenta uma baixa reflectância, menor do que 10%, na faixa espectral compreendida entre 380 e 700 nm e máxima absorção acima 700 nm.

Este comportamento, de maneira geral, foi observado em quatro das seis curvas da Figura 5, onde a imagem corrigida por DOS, a imagem corrigida pelo AtmCor4WV2 e a imagem corrigida pelo ATCOR 18km apresentaram a mesma tendência de maneira geral, abaixo de 10%, porém com valores diferentes de reflectância, especialmente para o método ATCOR 18km que apresenta valores de reflectância em 427 nm maiores que em 478 nm. Já a curva de reflectância da imagem sem correção apresentou valores médios muito maiores que os outros métodos. Esta diminuição da reflectância da água com a correção se deve a uma maior contribuição do espalhamento do que a absorção. Mesmo no infravermelho próximo isso ocorreu porque a reflectância da água é muito baixa e conseqüentemente o espalhamento passa a ter uma contribuição mais significativa do que a absorção pelo vapor d'água da atmosfera.

De acordo com Jensen (2009), o comportamento espectral do solo é afetado por diversos fatores dentre os quais se destacam: a cor do solo, o tipo do solo (latossolo, litossolo, podzólico), o teor de matéria orgânica, o teor de ferro, a composição mineralógica do solo (presença ou ausência de minerais escuros), o

teor de umidade e a sua textura (distribuição de tamanho das partículas presentes no solo, ou proporção de argila, silte e areia). O solo utilizado para a extração da curva de reflectância

é composto basicamente por sedimentos de areia inconsolidada, com pouca ou nenhuma matéria orgânica, tipicamente encontrado nas praias, sua curva está expressa na Figura 6 .

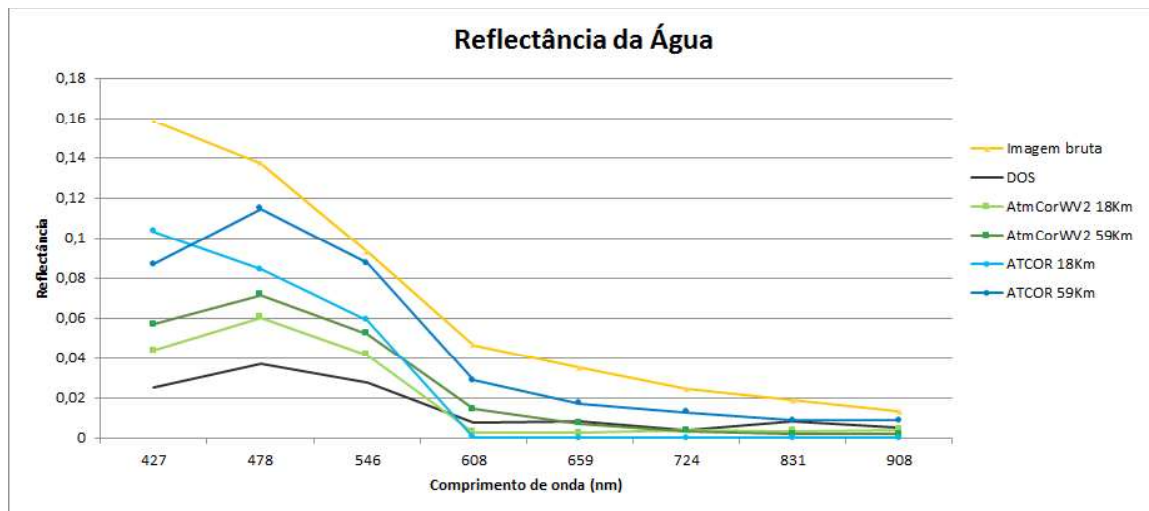


Fig. 5 - Valores da Reflectância Bidirecional (em fração, de 0 a 1) versus o comprimento de onda central da banda obtidos para a água do mar na imagem sem correção atmosférica e nas imagens corrigidas com DOS, ATCOR2 e AtmCor4WV2 para a imagem WorldView-2 na região da baía de Porto Seguro, BA, Brasil.

De maneira geral as correções apresentaram as mesmas tendências com valores crescentes conforme aumentam-se os comprimentos de onda. A imagem corrigida DOS apresentou os menores valores com comportamento similar à imagem não corrigida e com uma queda do infravermelho 1 (831 nm) para o infravermelho 2 (908 nm), comportamento não esperado para a classe de areia.

Os métodos AtmCor4WV2 18km e 59km apresentaram valores gerais muito próximos e dentro do esperado de 30% a 60% de reflectância para estes comprimentos de onda. Para as bandas no azul houve uma diminuição da reflectância por ser o espalhamento mais significativo do que a absorção para esta faixa do espectro, invertendo para o restante das bandas. Já os métodos do ATCOR apresentaram valores maiores que os outros métodos e acima de 80% de reflectância para os comprimentos de onda entre 546 e 908 nm, chegando em algumas bandas a ficar acima de 100%. Para a maioria das bandas a correção pelo ATCOR mais do que dobrou os valores de reflectância. Assim, os valores de reflectância bidirecional obtidos através do ATCOR se mostraram não realísticos. Isso tornou-se mais

aparente para a areia pelo fato de ter reflectância alta para toda a faixa do espectro estudado, em especial para o infravermelho próximo.

Os gráficos das figuras 3, 4 e 5, demonstraram em sua maioria:

- O método de correção DOS tende a apresentar valores mais baixos de reflectância que os outros métodos, sendo o método que apresentou maior correlação com a imagem sem correção atmosférica para a classe de vegetação e areia. Esses resultados ocorreram possivelmente devido a sua metodologia ser menos acurada que os outros métodos, entretanto possui fácil aplicação (MORAN *et al.*, 1992);
- Os métodos ATCOR2 para 18km e 59km de visibilidade apresentaram os valores mais altos de reflectância, superestimando os valores dos alvos. A provável causa disso é um cálculo excessivo pelo ATCOR da absorção pela atmosfera da superfície até o sensor, levando a um exagero na correção aplicada à imagem de reflectância aparente;
- Os métodos AtmCor4WV2 apresentaram os resultados mais esperados ao comportamento padrão espectral dos alvos. Tanto

o AtmCor4WV2 para 18km e 59km de visibilidade apresentaram valores muito próximos um do outro para a classe de vegetação e areia, para a classe de água do mar os valores de reflectância do AtmCor4WV2 59km são ligeiramente maiores que o método para 18km;

- A profundidade óptica de aerossóis, nos modelos representada pela visibilidade horizontal, afetou os valores de reflectância da superfície obtidos pela correção atmosférica, embora a sensibilidade tenha sido menor no AtmCor4WV2.

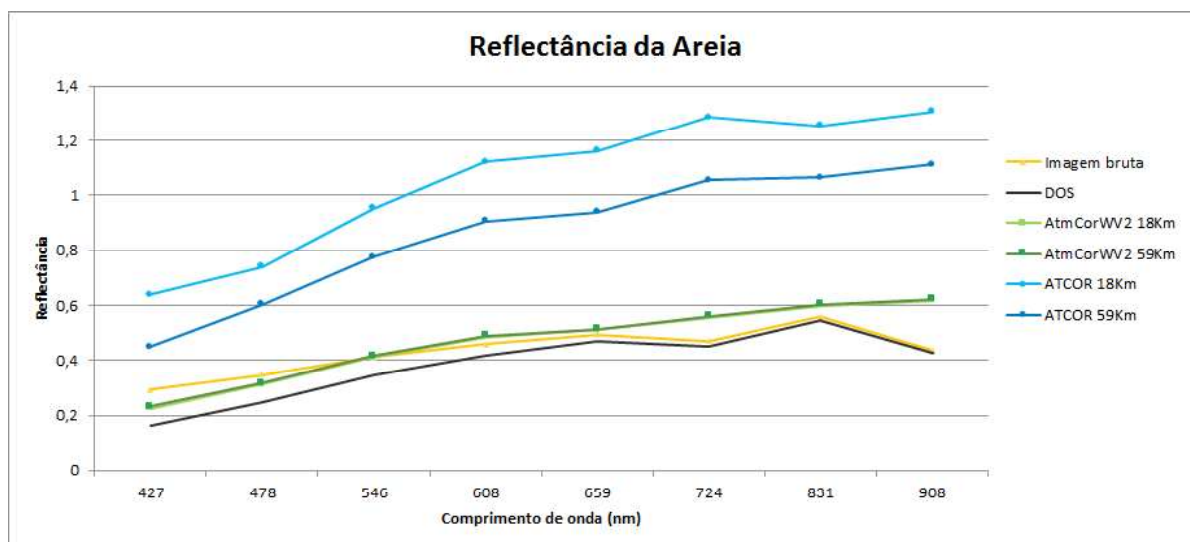


Fig. 6 - Valores da Reflectância Bidirecional (em fração, de 0 a 1) versus o comprimento de onda central da banda obtidos para a areia na imagem sem correção atmosférica e nas imagens corrigidas com DOS, ATCOR2 e AtmCor4WV2 para a imagem WorldView-2 na região da baía de Porto Seguro, BA, Brasil.

4. CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos, se recomenda a aplicação da correção atmosférica quando existe a necessidade de obtenção de informações dos alvos através da reflectância bidirecional, uma vez que a reflectância bidirecional aparente obtida no nível de satélite é modificada pelos efeitos atmosféricos. O valor de visibilidade horizontal afetou sensivelmente a correção atmosférica, sendo seu efeito dependente da faixa do espectro e da reflectância do alvo.

O método DOS não considera as diferenças de efeitos atmosféricos entre as faixas do espectro, por isso a correção apresentou um comportamento similar para todas as bandas. Para valores altos de reflectância aparente o ATCOR superestimou a correção e consequentemente gerou valores de reflectância da superfície fora do esperado para estas condições.

Embora a necessidade de correção atmosférica seja indiscutível para a interpretação

e análise de imagens de sensores orbitais, recomenda-se cuidado na escolha do modelo a ser utilizado, devendo ser observados o sensor utilizado, a área de estudo e os métodos comumente utilizados para um determinado estudo, para que hajam resultados coerentes entre os trabalhos. Além disso, é necessário que se analise se os resultados são plausíveis e fisicamente possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pela bolsa de mestrado e ao Projeto Coral Vivo e seus patrocinadores: Petrobras, através do Programa Petrobras Socioambiental, e Arraial D'Ajuda Ecoparque.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; COSTA, A. R.; GLERIANI, J. M. Correção atmosférica de imagens ALOS/AVNIR-2 utilizando o modelo 6S. *Revista Brasileira de Cartografia*, 64(4): pp. 531-539, 2012.

- CHAVEZ JR., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, 24: pp. 459-479, 1988.
- CHAVEZ, P.S. Image-based atmospheric correction-revisited and improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62 (9): pp. 1025-1036, 1996.
- DIGITAL GLOBE. **Radionetric Use of WorldView-2 Imagery**. Technical Note. 2010. 17p.
- DIGITAL GLOBE. **WorldView-2**. 2013. Disponível em <http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG_WorldView2_DS_PROD.pdf> Acesso realizado em 12 de janeiro de 2016.
- ENVI. **Guia do ENVI em Português**. 2000. Disponível em <<http://www.envi.com.br/index.php/downloads>>. Acesso realizado em 01 de junho de 2017.
- FONSECA, A. D.; FERNANDES, J. C. **Deteção remota**. Lisboa, Lidel, 2004. 224p.
- JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: An earth resource perspective**. 2ª edição. Pearson Education India, 2009. 608p.
- MORAN, M. S.; JACKSON, R. D.; SLATER, P. N.; TEILLET, P. M. Evaluation of Simplified Procedures for Retrieval of Land Surface Reflectance Factors from Satellite Sensor Output. **Remote Sensing of Environment**, 41(1-2):169-184, 1992.
- NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações**. Editora Edgard Blucher Ltda, 1992. 363p.
- PEGORARI, M. R. B. **Determinação de Bandas Espectrais a partir de dados Hiperspectrais**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente, 111 p., 2001.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: Ed. Parêntese, 138 p., 2009.
- QGIS. **User's Guide QGIS 2.14**. 2014. Disponível em <<http://www.qgis.org/en/docs/>>. Acesso realizado em 01 de junho de 2017.
- RICHTER, R.; SCHLÄPFER, D. **Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery**. ATCOR-2/3 User Guide, Version 8.2 BETA. ReSe Applications Schläpfer. 203 p., 2012.
- ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7ª Ed. Uberlândia: EDUFU, 264 p., 2009.
- SANCHES, I. D.; ANDRADE, R. G.; QUARTAROLI, C. F.; RODRIGUES, C. A. G. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, 05, 2011, Curitiba. Anais XV São José dos Campos: INPE, p. 7564-7571, 2011. On-line. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1555.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2014.
- SOARES, F. S.; ALMEIDA, R. K.; RUBIM, I. B.; BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; MELLO, G. V.; NETO, J. A. B. Análise comparativa da correção atmosférica de imagem do Landsat 8: o uso do 6S e do ATCOR2. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa, PB. P. 1821-1828. 2015. On-line. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0358.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2014.
- VERMOTE, E.F.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J.L. HERMAN, M.; MORCRETTE, J.J., Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 35(3): 675- 686, 1997.