

---

# CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZANDO VAPOR D'ÁGUA INTEGRADO A PARTIR DO PROCESSAMENTO PPP

ANDERSON REIS SOARES <sup>(1)</sup>  
ANA LÚCIA BEZERRA CANDEIAS <sup>(1)</sup>  
HAROLDO ANTONIO MARQUES <sup>(1)</sup>  
LUIZ FERNANDO SAPUCCI <sup>(2)</sup>

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE  
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG  
Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE  
[andersonreis.geo@gmail.com](mailto:andersonreis.geo@gmail.com), [analucia@ufpe.br](mailto:analucia@ufpe.br), [haroldoh2o@gmail.com](mailto:haroldoh2o@gmail.com)  
<sup>2)</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
Grupo de Desenvolvimento em Assimilação de Dados, Cachoeira Paulista, SP  
[luiz.sapucci@cptec.inpe.br](mailto:luiz.sapucci@cptec.inpe.br)

---

**RESUMO** - Este trabalho propõe a análise da correção atmosférica em imagens de sensoriamento remoto utilizando vapor d'água integrado obtido por processamento de dados GNSS. A metodologia consistiu na obtenção programada de uma imagem hiperespectral juntamente com o processamento de dados GNSS da estação RECF da RBMC localizada em Recife. A partir das observações GNSS, é possível estimar o atraso troposférico e a partir daí calcular o vapor d'água integrado à coluna atmosférica. A comparação do vapor d'água obtido através de processamento GNSS apresentou um valor inferior ao obtido através da razão entre bandas da imagem hiperespectral. Com a utilização do vapor d'água obtido pela imagem via GNSS houve um aumento na assinatura espectral do pixel analisado que chegou a 0,31, em valor de refletância.

**ABSTRACT** - This paper proposes the analysis of the atmospheric correction in remote sensing images using integrated water vapor obtained by GNSS processing. The methodology consisted in the acquisition of a scheduled hyperspectral image together with processing of GNSS data from RECF station of RBMC located in Recife. From the GNSS observations, it is possible to estimate the tropospheric delay and calculate the integrated water vapor at atmospheric column. From the results obtained there it was observed an underestimation of the IWV value obtained by GNSS data processing compared to that obtained by the ratio between bands of hyperspectral imaging. With the use of water vapor obtained by GNSS in the image there were an increase of 0.31, in reflectance value, in the spectral signature of the pixel located on RECF station.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto tem contribuído para estudos e mapeamentos da superfície terrestre. Para isto, as resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais do(s) sensor(e)s imageador(es) envolvidos nestes estudos são de fundamental importância. A geometria e a radiometria das imagens são pontos fundamentais para obter mapas temáticos representativos da verdade terrestre. Como exemplo, podemos citar estudos aquáticos apresentados em ENNES (2008); KRUSE (2003); RUDORF (2007); estudos para mapeamento da vegetação vistos em HADJIMITSIS, et. al. (2010); YU et. al. (2011) e também para estudo do ambiente urbano desenvolvidos por GAO et. al. (2009); TYAGI E BHOSLE (2011); THOMAS et. al. (2009).

A atenuação da radiação eletromagnética ocorre na sua passagem pela atmosfera, antes de atingir a sua superfície e após sua reflexão, até chegar ao sensor imageador. A consequência da atenuação do sinal é a geração de imagens alteradas quanto a radiometria. Isto pode causar problemas em estudos ambientais bem como na geração das cartas temáticas destes estudos.

Os principais constituintes da atmosfera responsáveis por esse fenômeno de atenuação são os aerossóis e o vapor d'água (NOVO, 2010; LILESAND, 2007). O vapor d'água é gerado a partir da evapotranspiração das plantas e dos animais e da evaporação da água dos rios, lagos e oceanos. Os efeitos da presença do vapor d'água na atmosfera e suas influências na vida humana estão intimamente relacionados com as variações da sua distribuição sob a superfície terrestre (SAPUCCI, 2001), por isso é de grande importância monitorar o comportamento dessa variável no espaço. O vapor d'água apresenta significativas oscilações em diferentes épocas do ano e posições geográficas (latitude, longitude, altitude, relevo etc).

Segundo JUNIOR (1996), a estimativa do vapor d'água existente na atmosfera é de interesse ao Sensoriamento Remoto devido aos efeitos gerados nas imagens de satélite, sendo ainda mais importante em condições tropicais, como as observadas em grande parte do Brasil. Contudo a tarefa para mitigação dos efeitos das variáveis atmosféricas não é simples, como relatado por KAUFMAN e GAO (1992), devido a interação entre esses elementos. Este artigo teve como objetivo avaliar o uso de dados de vapor d'água obtidos por levantamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) na correção de imagens de sensores hiperespectrais.

## 2 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

A correção atmosférica é uma etapa do pré-processamento em Sensoriamento Remoto quando a análise radiométrica é o foco. Especialmente quando imagens hiperespectrais são utilizadas é necessário realizar esse pré-processamento. Segundo BATISTA (2012), essa etapa é bastante controversa e de extrema importância no processamento de imagens, especialmente no processamento de imagens hiperespectrais que requer obrigatoriamente que as imagens passem pelo processo de correção atmosférica, já que as bandas desses sensores podem coincidir com áreas de absorção da atmosfera, bloqueando totalmente a passagem da radiação, enquanto uma imagem de uma banda adjacente sofre menos com esse efeito. De acordo com AGRAWAL e SARUP (2011) para que seja possível obter o máximo de informações de imagens de sensores hiperespectrais é necessária a realização da correção atmosférica.

Os algoritmos de correção do vapor d'água surgiram na metade da década de 80, com a criação dos primeiros algoritmos empíricos, outros algoritmos mais robustos como os que se baseiam em modelos de transferência radiativa, surgiram no início da década de 90. O primeiro modelo proposto foi o ATREM (*Atmosphere Removal*), proposto por GAO (1993).

Após a criação do modelo desenvolvido por Gao, vários outros algoritmos surgiram, como: *High-accuracy Atmospheric Correction for Hyperspectral Data* (HATCH) (QU et al., 2003), o *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (ADLER-GOLDEN et al., 1999), o *Imaging Spectrometer Data Analysis System* (ISDAS) (STAENZ et al., 1998), e o *Atmospheric and Topographic Correction* (ATCOR) (RICHTER, 1996, 1998; RICHTER & SCHLAEPFER, 2002).

O algoritmo FLAASH foi desenvolvido pela *Spectral Sciences, Inc.*, através de uma parceria com o Laboratório de pesquisas da Força Aérea dos Estados Unidos. De acordo com FELDE *et al.* (2003) esse algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de eliminar os efeitos causados pelo espalhamento e pela absorção para obtenção dos valores de reflectância dos alvos imageados em imagens multiespectrais e hiperespectrais. Ele se baseia no MODTRAN 4, que é um modelo de transferência radiativa, e utiliza uma série de equações para o cálculo da transmitância e radiância para frequências de 0 a 20  $\mu\text{m}$  com uma resolução espectral moderada de 0,0001  $\mu\text{m}$  (KAWISHWAR, 2007).

Para correção atmosférica, o FLAASH requer alguns dados como: vapor d'água, hora e data do imageamento, definição do algoritmo de espalhamento, ângulo azimutal e de elevação do sensor, entre outros. Ele pode ser utilizado para corrigir imagens que estejam dentro do espectro visível até o infravermelho médio, na região de 3  $\mu\text{m}$ . Para obtenção da radiância espectral do pixel na imagem é utilizada a seguinte equação:

$$L' = \left[ \frac{A\rho}{(1-\rho eS)} \right] + \left[ \frac{B\rho e}{(1-\rho eS)} \right] + La \quad 1$$

Onde:  $L'$  é a radiância no sensor,  $\rho$  é a reflectância do pixel na superfície,  $\rho e$  é a média da reflectância no entorno do pixel,  $S$  é o albedo do topo da atmosfera,  $La$  é a radiação espalhada pela superfície e  $A$  e  $B$  são coeficientes que dependem da geometria e da condição atmosférica.

O primeiro termo da equação corresponde a radiação refletida pela superfície que chega ao sensor e o segundo é a radiação refletida que é espalhada pela superfície e chega ao sensor. A diferença entre os dois termos ocorre em função da mistura espectral, que ocorre devido ao espalhamento, e para calcular esse parâmetro são utilizados os ângulos de visada do satélite e do Sol além da altitude e do modelo de aerossol selecionado.

O vapor d'água utilizado pelo FLAASH pode ser obtido através das próprias imagens, desde que o sistema sensor possua duas bandas em pelo menos uma das três regiões (0,82  $\mu\text{m}$ , 0,94  $\mu\text{m}$  e 1,135  $\mu\text{m}$ ) utilizadas para o cálculo. A partir de uma razão entre bandas é possível estimar o vapor d'água para cada pixel da imagem, contudo nem todos os sensores possuem mais de uma banda nessas regiões, geralmente apenas sensores hiperespectrais, por isso alguns valores são propostos para utilização, Tabela 1, em função da área de estudo e da época do ano. Segundo MATHER (2011) essa estimativa resulta em perda de acurácia e o efeito dessa inexatidão não é avaliável. Os valores

sugeridos nem sempre retratam a realidade da área no momento do imageamento, o que acarreta em uma resposta espectral maior ou menor do que o esperado, dependendo do valor utilizado.

O FLAASH tem como grande destaque os modelos de aerossóis que utilizam em seu algoritmo de espalhamento. Os modelos de aerossóis presentes são 4: *Rural*, que considera uma baixa quantidade de partículas na atmosfera, o *Urban*, que é indicado para áreas adensadas e com indústrias, o *Maritim*, que considera áreas próximas ao oceano, contudo ele não é indicado para o Recife, já que omite grandes partículas, e o *Tropospheric* que considera a atmosfera com pequenas partículas, como no rural, e em baixa quantidade.

TABELA 1 **Erro! Nenhuma seqüência foi especificada.** Valor Recomendados para Vapor D'água.  
Fonte: Adaptado de Felde et. al. (2004)

Modelo Atmosférico	Vapor D'água (g/cm <sup>2</sup> )
Sub-ártico de Inverno (SI)	0,42
Média Latitude de Inverno (MLI)	0,85
Sub-ártico de Verão (SV)	2,08
Média Latitude de Verão (MLV)	2,92
Tropical (T)	4,11

### 3 ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO

O sinal do GNSS assim como o Sensoriamento Remoto, sofre com os efeitos da atmosfera. Esses ocorrem ao longo da atmosfera, desde as altas camadas, a ionosfera, até a troposfera. Nesta o erro é causado pela variação do índice de refração (n) dos gases atmosféricos. Essa variação provoca desvio na trajetória do sinal em relação à trajetória geométrica entre o satélite e o receptor GNSS (MONICO, 2008).

A troposfera, que varia entre 0 e 50km, é um meio não dispersivo, ou seja, sua influência não depende da frequência da onda. Os valores do atraso troposférico podem ser estimados a partir das observações GNSS, de modelos baseados na previsão numérica do tempo, ou de modelos matemáticos, como o de Hopfield e o de Saatismonen, por exemplo. De acordo com MARQUES (2012), os modelos matemáticos para o cálculo do ZTD, geralmente, dispõem de funções de mapeamento, onde para ângulos próximos a 90° é realizada, por exemplo, uma aproximação de 1/sen(E), onde E é o ângulo de elevação do satélite. O uso de observações GNSS para a obtenção dessa variável vem sendo amplamente pesquisada em aplicações em meteorologia [BEVIS et. al. (1992); GUTMAN e BENJAMIN (2001); SAPUCCI (2001); SAPUCCI et. al. (2004); ADAMS et. al. (2010)]. De forma simplificada o atraso troposférico pode ser escrito como (MONICO, 2008):

$$T_r^S = [T_{ZH} \cdot mh(E) + T_{ZW} \cdot mw(E)] \quad 2$$

Onde:  $T_{zh}$  é o atraso da componente hidrostática,  $T_{zw}$  é o atraso zenital da componente úmida e  $mh(E)$  e  $mw(E)$  são as funções de mapeamento para as componentes hidrostáticas e úmida, respectivamente e  $E$  é o ângulo de elevação do satélite.

A componente úmida (*Zenithal Wet Delay - ZWD*), é formada pela influência do vapor d'água, e a componente hidrostática (*Zenithal Hydrostatic Delay - ZHD*), é formada pela influência dos demais gases que compõem a troposfera, sobretudo, o nitrogênio e o oxigênio (SAPUCCI et.al. 2004, MONICO, 2008). Para estimar o ZTD é utilizada a equação desenvolvida por SPILKER (1994). A partir do valor do ZWD obtido através da modelagem do atraso troposférico é possível estimar o IWV.

$$IWV = ZWD \times \frac{10^6}{R_w [k'_2 + \frac{k_3}{T_m}]} \quad 3$$

Onde:  $IWV$  é o vapor d'água integrado na coluna atmosférica,  $ZWD$  é a componente úmida do atraso troposférico,  $R_w$  é a constante específica para o vapor d'água,  $T_m$  é a temperatura média troposférica e  $k'_2$  e  $k_3$  são constantes da refratividade atmosférica.

A relação entre o ZWD calculado e a quantidade de IWV, é obtida em função da temperatura no momento em que foram feitas as observações em função da temperatura média troposférica ( $T_m$ ) BEVIS et al. (1992). Para regiões do território brasileiro, SAPUCCI (2014) desenvolveu uma modelagem que relaciona os valores de  $T_m$  com dados obtidos à superfície.

$$T_m = 0,558xTS + 0,105xPs + 110,578 \quad 4$$

Onde:  $T_m$  é a temperatura média da coluna vertical troposférica,  $T_s$  é a temperatura na superfície e  $P_s$  é a pressão na superfície.

## 4 METODOLOGIA

### MATERIAIS

Foram obtidas junto a USGS (*United States Geological Survey*) imagens do dia 25/04/2014 do sensor *Hyperion*. Este sensor está a bordo da plataforma EO-1 (*Earth Observing-1*) que foi lançada pela NASA em 21 de novembro de 2000. Ele possui 242 bandas, com 10nm de largura, que estão distribuídas entre o visível e infravermelho, com resolução espacial nominal de 30m e temporal de 16 dias e resolução radiométrica de 16bits. De acordo com PEARLMAN *et. al.* (2003), a calibração radiométrica absoluta e *pixel a pixel*, são diretamente realizadas usando o sistema de calibração interna e a irradiância solar.

Ambas as imagens foram obtidas com nível de processamento L1GST, com resolução espacial de 29,98m. Os dados de obtenção da imagem estão descritos na Tabela 2.

TABELA 2. Dados de Obtenção da Imagem Hiperespectral

Órbita/Ponto	214/65
Horário de Passagem	11:36:24
Azimute Solar	61,98°
Elevação Solar	45,12°
Inclinação do Satélite	97,99°
Ângulo de Visada	3,98°

### MÉTODO

Inicialmente foi realizada a obtenção e conversão dos valores de ZTD para IWV. Para isso foi utilizado os dados da estação RECF, localizada na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Por meio do arquivo de observações obtidos no site do IBGE, foi utilizado o *software* online de processamento PPP também do IBGE. Com os arquivos gerados por esse *software*, o valor do ZTD foi obtido e aplicado a equação 3, através de um algoritmo criado em linguagem *Python*. O valor de temperatura média da camada atmosférica utilizado, foi obtido através do Modelo Brasileiro de  $T_m$ , equação 4, desenvolvido por SAPUCCI (2014), utilizando os dados de temperatura obtidos pela estação meteorológica posicionada junto a estação RECF.

Em seguida foi realizada a correção das imagens hiperespectrais. Para comparação entre a técnica proposta e a tradicional utilizando a razão entre bandas, foram realizados dois processos de correção atmosférica. No primeiro, foi realizado o processo utilizando o algoritmo FLAASH de forma tradicional, utilizando o valor para o vapor d'água obtido através da opção *water retrieval*, em seguida o valor obtido através do algoritmo em Fortran foi utilizado como fator multiplicativo na correção da imagem.

### Método Convencional (Razão Entre Bandas)

Inicialmente as bandas foram importadas através do *plugin Hyperion Tools* disponibilizado no site da desenvolvedora do ENVI. Após a importação das 242 bandas, para ambas as datas, 46 bandas foram eliminadas pela alta presença de ruídos e passaram pelo processo de reamostragem espacial, utilizando o algoritmo vizinho mais próximo, passando assim a dimensão dos pixels para 30m. Em seguida o algoritmo FLAASH foi utilizado com o modelo atmosférico *Tropical*, e modelo de aerossol *Urban*, para se adequar as características da região. O número de direções de espalhamento foi de 8 e a resolução do MODTRAN de  $5\text{cm}^{-1}$ . O algoritmo de espalhamento utilizado foi o DISORT. Para obtenção do vapor d'água atmosférico o FLAASH realiza a estimativa através da razão entre bandas espectrais localizadas no infravermelho. Nesse processamento foram utilizadas como dados de reflectância as bandas 35, 36, 43 e 44 e como bandas de absorção, as 39 e 40.

TABELA 3. Parâmetros Utilizadas para Correção Atmosférica Através do Método Convencional

Parâmetro	Definição
Altitude do Sensor	705km
Altitude Média	4m
<i>Water Retrieval</i>	820nm
Algoritmo de Espalhamento	DISORT
Modelo de Aerossol	<i>Urban</i>

### Método Proposto (I WV obtido a partir de processamento GNSS)

Em seguida mais uma vez imagens brutas passaram pelo algoritmo FLAASH, mas desta vez, utilizando os dados para o vapor d'água obtidos através de observações do receptor geodésico instalado no campus da UFPE. O arquivo de observações foi obtido através do site do IBGE e submetido para o processamento PPP no mesmo site. A partir dos valores da componente úmida foi possível calcular os valores de IWV para a cena. Para isso foi utilizada a observação GNSS mais próxima do momento de obtenção da linha da imagem, que corresponde ao local onde está localizada a estação RECF.

Como o valor resultante da equação 3 é em  $\text{kg/m}^2$ , foi necessário realizar a conversão para  $\text{g/cm}^2$  como descrito em FISCHER et. al. (2010), utilizando uma simples divisão do valor obtido por 10. A partir desse valor foi determinado o fator multiplicativo. Este foi obtido através de uma simples regra de três e foi aplicado a toda imagem. Para esse cálculo foi utilizada a seguinte expressão:

$$Fm = IWV\text{-GNSS} * IWV\text{-FLAASH}^{-1} \quad 5$$

Onde:  $Fm$  é o fator multiplicativo,  $I WV\text{-GNSS}$  foi o valor obtido através do processamento GNSS convertido para  $\text{g/cm}^2$  e  $I WV\text{-FLAASH}$  é o valor para o vapor d'água para o tipo de modelo escolhido que no caso foi de  $4,11 \text{g/cm}^2$ .

Por esse valor representar apenas um pixel na imagem somente as áreas próximas a estação RECF, de onde esse valor foi obtido, com distância máxima de 10km, tiveram assinaturas espectrais analisadas. Os demais parâmetros aplicados na imagem estão descritos abaixo.

TABELA 4. Parâmetros Utilizadas para Correção Atmosférica  
Através do Método Convencional

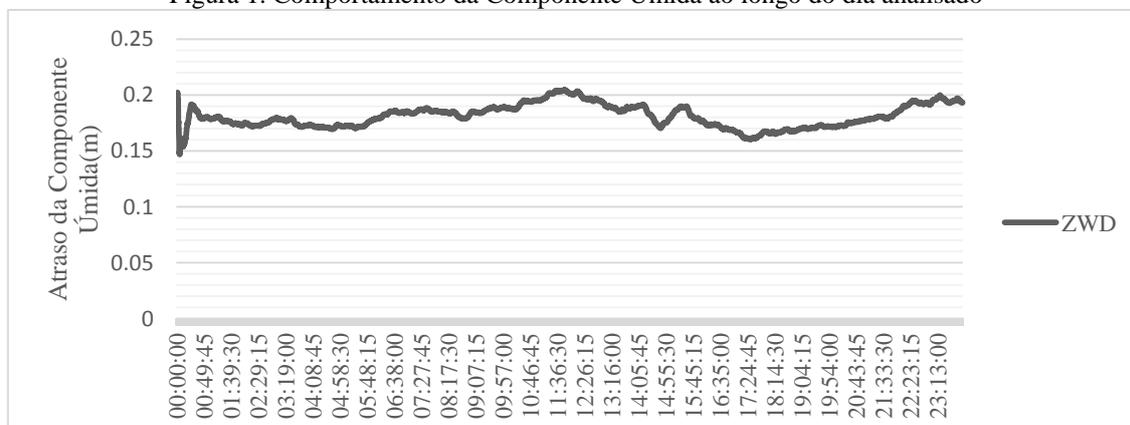
Parâmetro	Definição
Altitude do Sensor	705km
Altitude Média	4m
Fator Multiplicativo	0,721
Algoritmo de Espalhamento	DISORT
Modelo de Aerossol	Urban

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Processamentos GNSS

Através de um dos arquivos gerados pelo processamento PPP, as observações referentes a componente úmida foram extraídas e convertidas em IWV, utilizando as equações 3 e 4. Como pode ser observado no gráfico abaixo, os dados iniciais apresentaram variações que ocorre em função do curto tempo de rastreamento ocasionando a não solução, ou não fixação, das ambiguidades das observações. Após a fase de estabilização, cerca de 1h após o início do rastreamento, a média da componente úmida foi de  $0,181 \text{m}$  e o desvio padrão foi de  $0,010 \text{m}$ . No momento da passagem do satélite sobre a estação RECF, o valor obtido foi de  $2,95 \text{g/cm}^2$ .

Figura 1. Comportamento da Componente Úmida ao longo do dia analisado



5.2 Correção Atmosférica

Para a correção atmosférica das imagens foi utilizando a razão entre bandas com a região de 820nm, como referência para o cálculo do vapor d’água. Para a imagem 1, o valor médio da variável foi de 3,47 g/cm<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 0,70 g/cm<sup>2</sup>, os valores máximos e mínimos foram respectivamente, 5,03 g/cm<sup>2</sup> e 1,66 g/cm<sup>2</sup>. Se não fosse possível a utilização das bandas do sensor para esse cálculo, para essa imagem deveria ser utilizado um fator multiplicativo de 0,84. A visibilidade calculada pelo FLAASH foi de 21,30 km, sendo assim podemos considerar que a atmosfera estava bastante densa no momento da passagem do satélite, afetando fortemente a propagação da radiação e por consequencia, afetando fortemente a imagem.

Em um raio de 10km da estação RECF, foi calculada através de um buffer os valores máximos e mínimos, estes foram respectivamente 1,70 g/cm<sup>2</sup> e 5,03 g/cm<sup>2</sup>. A média foi de 4,10 g/cm<sup>2</sup> e o desvio padrão foi de 1,22 g/cm<sup>2</sup>. Sobre a estação o valor do IWV calculado foi de 3,847 g/cm<sup>2</sup>. Foram realizados dois perfis, um transversal e outro longitudinal em função do pixel onde está localizada a estação RECF. Como pode ser observado na Figura 2, longitudinalmente o vapor d’água se comportou de forma estável, apresentando maiores variações em apenas 2 pontos, como apresentado na Figura 3 que representa o perfil transversal do vapor d’água. Os pixels que apresentaram baixos valores são pixels de nuvens.

Figura 2. Perfil Longitudinal Da Imagem de Vapor D’Água

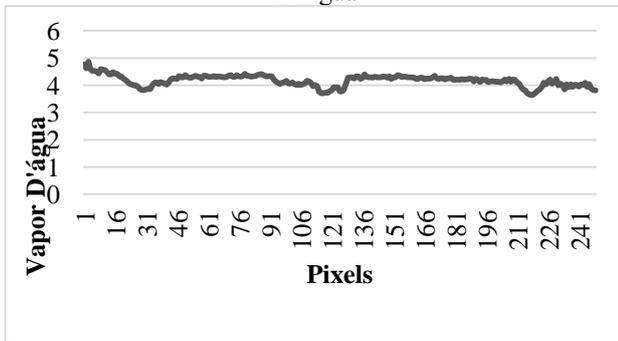
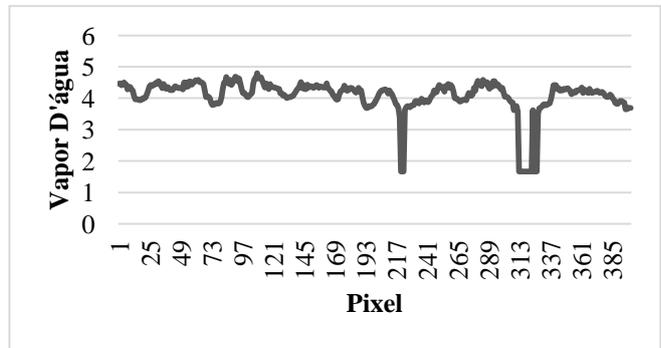


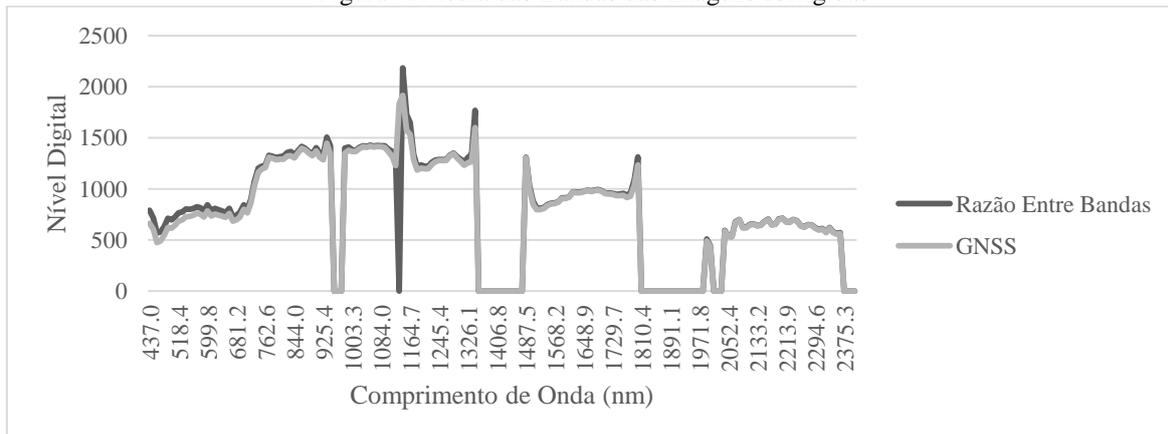
Figura 3. Perfil Transversal Da Imagem de Vapor D’Água



Através do valor calculado por meio da equação 5, o valor multiplicativo para o vapor d’água aplicado a cena foi 0,721. Com esse valor, a correção atmosférica resultou em um valor para visibilidade diferente, de 20,75 km. O valor médio informado foi de 2,95 g/cm<sup>2</sup>, esse valor demonstra que o *software* realmente utilizou o valor inserido no cálculo. O valor médio da cena utilizando a razão entre bandas foi inferior, cerca de 1,14g/cm<sup>2</sup>. Sobre o ponto onde está localizada a estação RECF, a diferença entre os valores estimados via GNSS na estação e pela imagem foi de 0,89 g/cm<sup>2</sup>.

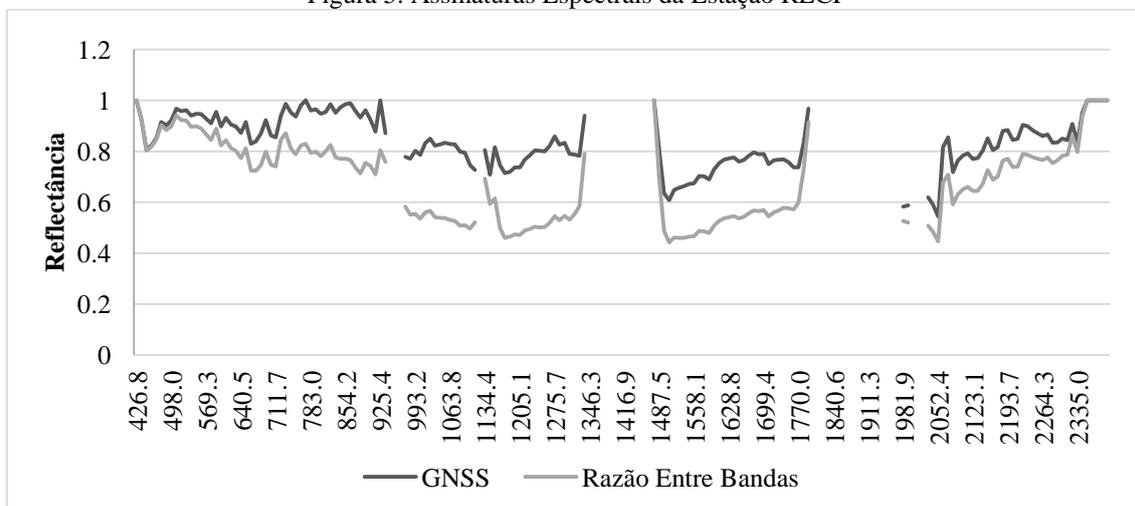
A partir da operação de recorte realizada, para a área de 10km a partir da estação RECF, as médias das 196 bandas foram analisadas. Como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 4, na região do infravermelho próximo existem pequenas diferenças, enquanto na região do visível, houve pequenas diferenças, especialmente nas bandas iniciais. Essa diferença pode existir devido a forma como a visibilidade foi calculada. Diferente da imagem corrigida utilizando a razão entre bandas, o valor da visibilidade calculada pelo algoritmo, quando foi utilizado o fator multiplicativo, foi menor, cerca de 600m, essa redução influenciou na correção da imagem na região do visível.

Figura 4. Média das Bandas das imagens corrigidas



A Figura 5 representa a assinatura espectral do pixel sobre a qual está posicionada a estação RECF. As respostas nas bandas iniciais e finais são semelhantes, contudo nas demais regiões os padrões de resposta se tornam muito elevados, a uma variação que chegou a 0,31 em refletância na região do infravermelho.

Figura 5. Assinaturas Espectrais da Estação RECF



#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização dos dados de IWV, obtido através de processamento GNSS, apresentou resultados distintos aos obtidos pela técnica de razão entre bandas, cerca de 0,31, em nível refletância, na região do infravermelho. Essa variação na assinatura espectral, ocorreu fundamentalmente, em função da diferença de 0,89 g/cm<sup>2</sup> do valor do vapor d'água obtido pelas duas técnicas. A técnica de razão entre bandas pode superestimar o valor do vapor d'água contido no *pixel*, em função dos materiais contidos nele. Sendo assim, o valor obtido pelo processamento dos dados GNSS é coerente com o obtido pela técnica de razão entre bandas. Deverão ser realizados testes utilizando espectrorradiômetros para avaliação da assinatura espectral, dessa forma será possível avaliar qual dos métodos apresentará melhores resultados com um maior número de observações.

#### REFERÊNCIAS

- ADLER-GOLDEN, S.M.; MATTHEW, M.W.; BERNSTEIN, L. S.; LEVINE, R. Y.; BERK, A.; RICHTSMEIER, S. C.; P.K. ACHARYAA, G.P.; ANDERSON, G.; FELDE, J.; GARDNER, M.; HOKE, L. S.; JEONG, B.; PUKALL, J.; MELLO, A.; RATKOWSKI H.; BURKE, H. 1999. *Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4*. In: R. O. Green (Ed.), **Summaries of the Eighth JPL Airborne Earth Science Workshop**JPL Publication, Vol. 99-17. (pp.21-29) Pasadena, California: Jet Propul. Lab.1.
- ADAMS, D. K.; FERNANDES, R.M.S.; KURSINSKI, E. R.; MAIA, J. M.; SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A.; VITORELLO, I.; HOLUB, K.; GUTMAN, S.; FILIZOLA, N.; BENNETT, R. A. 2010. **Uma densa rede meteorológica GNSS para a observação de convecção profunda na Amazônia**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia.
- AGRAWAL, G.; SARUP, J. *Comparision of QUAC and FLAASH Atmospheric Correction Modules on EO-1 Hyperion Data of Sanchi*. 2011. **International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies**, Vol. nº 4, Issue nº1, 176-186.
- BAPTISTA, G. M. de M. Processamento de Dados Hiperespectrais. In: Paulo Roberto Meneses; Tati de Almeida. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1 ed. Brasília: UnB/CNPq, 2012, v. 1, p. 221-238.
- BEVIS M.; BUSINGER S.; HERRING T.A.; ROCKEN C.; ANTHES R.A.; WARE R.H. *GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System*. **J. Geophysical Research**, 1992, vol. nº 97, 15787-15801.

BEVIS, M.; BUSINGER, S.; CHISWELL, S.; HERRING, T.A.; ANTHES, R.; ROCKEN, C.; WARE R.H. *GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays into precipitable water*. **Journal of Applied Meteorology**, 33, 379-386, 1994.

BOCK, Y.; WILLIAMS, S. D. P. (1997), *Integrated satellite interferometry in southern California*, **Eos Trans. AGU**, 78(29), 299-300.

DAVIS J.L.; HERRING T.A.; SHAPIRO I.; ROGERS, A.E.; ELGENED G. 1985. *Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length*. Disponível em:<[http://www.researchgate.net/publication/23873239\\_Geodesy\\_by\\_radio\\_interferometry\\_-\\_Effects\\_of\\_atmospheric\\_modeling\\_errors\\_on\\_estimates\\_of\\_baseline\\_length](http://www.researchgate.net/publication/23873239_Geodesy_by_radio_interferometry_-_Effects_of_atmospheric_modeling_errors_on_estimates_of_baseline_length)> Acessado em: 09/10/2013.

ENNES, R. **Potencial Das Imagens Hiperespectrais Orbitais Na Detecção De Componentes Ópticamente Ativos No Reservatório De Itaparanga**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus Presidente Prudente, Presidente Prudente.

FELDE, G. W.; ANDERSON, G. P.; ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW M. W.; BERK, A. *Analysis of Hyperion Data with the FLAASH Atmospheric Correction Algorithm*. **Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX**. SPIE Aerosense Conference, Orlando. 21-25 April 2003.

FISCHER, J.; LEINWEBER, R.; PREUSKER, R. *Retrieval of Total Water Vapour Content from MERIS Measurements*. **Algorithm Theoretical Basis Document**. Free University Berlin, Insitute for Space Science. 2010.

GAO, B.-C., HEIDEBRECHT, K. B., & GOETZ, A. F. H. *Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data*, **Remote Sensing of Environment**, Vol. 44, 165-178. 1993.

HADJIMITSIS, D.G.; PAPADAVID, G.; AGAPIOU, A.; THEMISTOCLEOUS, K.; HADJIMITSIS, M. G.; RETALIS, A.; MICHAELIDES, S.; CHRYSOULAKIS, N.; TOULIOS, L.; CLAYTON, C. R. I. 2010, In: *Natural Hazards And Earth System Science* Vol. 10, pg.:89-95.

GUTMAN, S.; BENJAMIN, S. *The role of ground-based GPS meteorological observations in numerical weather prediction*. **GPS Solutions**. v. 4, p. 16-24, 2001.

JUNIOR, J. Z.; GU, X.; GUYOT, G.; PINTO, H. S.; HAMADA, E.; ALMEIDA, C. A. S. de; PELLEGRINO, G. Q. **Estimativa do Conteúdo de Vapor d'Água a Partir da Radiação Solar Direta**. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 979-980.

KAUFMAN, Y. J.; GAO, B. *Remote Sensing of Water Vapor in the Near IR from EOS/MODIS*. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, Vol. 30, N°. 5, september, 1992.

KAWISHWAR, P. *Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion EO-1 Data*. 2007. Dissertação (Mestrado em Geoinformática). International Institute For Geo-Information Science And Earth Observation Enschede, The Netherlands And Indian Institute Of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency (Nrsa), Department Of Space, Government Of India, Dehra Dun, India.

KRUSE, F. A. *Preliminary results - hyperspectral mapping of coral reef systems using EO-1 Hyperion, Buck Island, U.S. Virgin Islands*. In: **JPL Airborne Earth Science Workshop**, 12. 2003, Pasadena, USA. Proceedings. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. p. 157-173. 2003.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J. W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2007. 4ª Edition. New York. John Wiley & Sons.

MARQUES, H. A. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente.

MATHER, P. M.; KOCH, M. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. 2011. 4th ed. ISBN 978-0-470-74239-6.

- 
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento Pelo Gns - Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 2008. Editora Unesp, 2ª EDIÇÃO. ISBN 8571397880.
- NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 2010, 4ª edição, Blucher.
- QU, Z.; KINDEL, B. C.; GOETZ, A. F. H. 2003. *The high accuracy atmospheric correction for hyperspectral data (HATCH) model*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 41, 1223–1231.
- RICHTER, R. (1996). *Atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data*. **Computers & Geosciences**, 22, 785–793.
- RICHTER, R.; SCHLAEPFER, D. *Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data, Part 2: atmospheric/topographic correction*. **International Journal of Remote Sensing**, 23(13) 2002:2631–2649.
- RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S.; PEREIRA FILHO, W. **Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia**. *Acta Amazônica*, Vol. 37(2) 2007: 269 – 280.
- RSI. *Research Systems Inc. Manual do ENVI*. ENVI Version 4.7. *Research Systems Inc*, 2009.
- SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001.
- SAPUCCI, L.F.; MONICO, J.F.G. **Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território Brasileiro utilizando GPS**. In: Séries em Ciências Geodésicas 30 anos de Pós Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. Curitiba, 2001, v. 1, p. 47-61.
- SAPUCCI, L.F.; MACHADO, L.A.T.; MONICO, J.F.G. **Modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico para américa do sul empregando previsão numérica de tempo**. I SIMGEO, 2004.
- SAPUCCI, L. F., 2014: **Evaluation of modeling water-vapor-weighted mean tropospheric temperature for gns-integrated water vapor estimates in Brazil**. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 715–730. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-13-048.1>
- SPIPKER, J.; J. JR. *Tropospheric Effects on GPS*. In: *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Vol. 1, 1994, p. 517 – 546
- THOMAS, C., DOZ, S., BRIOTTET, X., SANTER, R., BOLDO, D. AND MATHIEU, S. *Remote Sensing of Aerosols in Urban Areas: Sun/Shadow Retrieval Procedure from Airborne Very High Spatial Resolution Images*. In: **Proceedings of 2009 Joint Urban Remote Sensing Event**. 26 de Junho 2009, Shanghai. pp.1–6. New Brunswick, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- TYAGI, P., BHOSLE, U. *Atmospheric Correction of Remotely Sensed Images in Spatial and Transform Domain*. **International Journal of Image Processing (IJIP)**, Volume 5, Issue 5, 2011.
- YU, L.; PORWAL, A.; HOLDEN, E.; DENTITH, M. C. *Suppression of vegetation in multispectral remote sensing images*, **International Journal of Remote Sensing**, 32:22, P7343-7357, 2011.