

Avaliação da aplicação da transformação wavelet e análise de componentes independentes em imagens hiperespectrais no LWIR para a detecção de plumas de metano em regiões continentais

Rebecca Del Papa Moreira Scafutto
Carlos Roberto de Souza Filho

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6152 - 13083970 - Campinas - SP, Brasil
rebecca.scafutto@gmail.com, beto@ige.unicamp.br

Abstract. Research focused on the detection of methane (CH₄) emissions has been gaining attention. Methane is the main component of natural gas and emission rates related to the oil industry comprises a large percentage of the global budget. However, these are still poor explored sources and contributions for methane concentration in the atmosphere from this segment are not well defined. Remote sensing tools have the potential to assist in the detection of fugitive CH₄ emissions, which escapes through leaks in the pipeline network or storage tanks in refineries. Large spatial cover combined with high spectral resolution of airborne hyperspectral imaging sensors supports the direct mapping of gas plumes. Here, we process images acquired with the thermal imaging sensor Hytes (NASA) from Kern River Oil Field (California – EUA) with wavelets transformation and Independent Component Analysis (ICA) technique. Preliminary results demonstrates that these techniques can be used for the detection of CH₄ sources. The methane plumes from storage tanks were identified and the spectral features of the gas (7.6 - 7.9 μm) highlighted. The methodology study here can be useful for the detection of methane sources related to the oil industry, assisting to reduce production losses and refine estimations of CH₄ emission rates from this segment.

Palavras-chave: long-wave infrared, hyperspectral, methane, imaging, Hytes, infravermelho de ondas longas, hiperespectral, metano, imageamento, Hytes.

1. Introdução

As concentrações de metano (CH₄) na atmosfera aumentaram significativamente nos últimos dois séculos (Roberts, et al., 2010; Kameniak et. al., 2015). Este aumento nos índices global e regional tem sido alvo de diversos estudos recentes (Dlugokencky et al., 2009; Kirschke et al., 2011; Thorpe, et al., 2014; Miller et al., 2014), estimulando o desenvolvimento de novas metodologias para a detecção de fontes de emissão deste gás. O CH₄, principal componente do gás natural, têm sua origem em fontes naturais e antropogênicas. Emissões relacionadas à indústria petrolífera representam a segunda maior fonte de liberação de CH₄ para a atmosfera (cerca de 20 a 30% do balanço global - Lasseby et al., 2007; Etiope et al., 2009). No entanto, micro-exsudações provenientes de escapes naturais de reservatórios em subsuperfície e pequenos vazamentos nas redes de armazenamento (i.e. tanques de refinarias) e distribuição (i.e. gasodutos), são ainda fontes negligenciadas no balanço global.

O sensoriamento remoto oferece ferramentas versáteis que podem ser utilizadas para a detecção em escalas variadas. Sensores hiperespectrais a bordo de aeronaves apresentam potencial para a detecção remota direta e mapeamento de plumas de CH₄ na superfície (Bradley et al., 2011; Kastek et al., 2012; Thorpe et al., 2012, 2013, 2014). Além da rápida aquisição e processamento de dados, a elevada resolução espectral destes sensores permite a exploração da assinatura espectral do alvo, a qual pode ser utilizada para a identificação remota detalhada de materiais e estimativas de sua abundância (Salem & Kafatos, 2005).

A assinatura espectral do metano é caracterizada por bandas de absorção espectral no infravermelho de ondas longas (LWIR – *Long-wave Infrared*), geradas pelas transições vibracionais C-H, centradas em 7.4-8 μm (Krier e Sherstnev, 2000, Hausmann et al., 2002; Barnhouse Jr., 2005, Neiderer, 2011). A detecção de plumas de gás no LWIR se baseia nas

diferenças relativas de emissividade (ou temperatura) entre a superfície e a pluma, descrita pelo modelo de radiância (Heasler et al., 2007, Messinger et al., 2007, Walsh et al., 2008). Publicações recentes de Tratt et al. (2014) e Hulley et al. (2016) apresentam resultados que demonstram a eficácia de sensores termais para este fim contudo, as técnicas utilizadas para a detecção do CH₄ são complexas e os autores não exploram as variações na assinatura espectral contidas na pluma.

A presente pesquisa consiste no desenvolvimento e avaliação de técnicas simplificadas para a detecção de plumas de metano em refinarias e gasodutos. Para alcançar os objetivos propostos imagens do sensor Hytes (*Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer*; Hook et al., 2009), adquiridas pelo Jet Propulsion Laboratory (JPL) - NASA foram processadas com as técnicas de *wavelets* e Análise de Componentes Independentes (ACI) para o mapeamento e caracterização da pluma.

2. Metodologia de Trabalho

Esta parte inicial da pesquisa está focada na detecção de plumas de metano provenientes de emissões fugitivas em refinarias. Neste estudo, imagens obtidas em 2014 e 2015 com o sensor Hytes (solicitadas em <http://hytes.jpl.nasa.gov>) estão sendo utilizadas para processamento e análise. O equipamento consiste em um sensor hiperespectral aerotransportado com 256 bandas, distribuídas no intervalo de 7.5 – 12 μ m e 18 nm de resolução. A imagem aqui apresentada foi adquirida em 02 de Agosto de 2015 a aproximadamente 1150 m de altitude (tamanho aproximado do pixel: 2m), sobre a região de *Kern River Oil Field* (Figura 1), um campo de produção e armazenamento de petróleo localizado em *Kern County* na Califórnia (EUA).

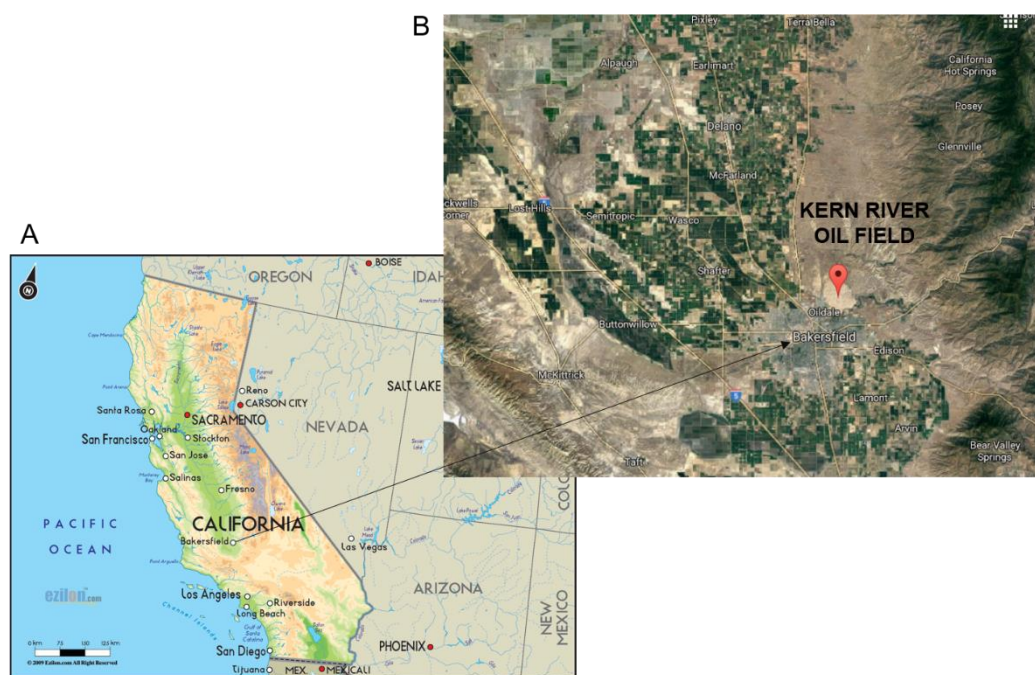


Figura 1. Localização do *Kern River Oil Field*. (A) mapa de localização do estado da Califórnia, costa oeste dos Estados Unidos. (B) detalhe da região de *Kern County*. A área sinalizada em vermelho indica a localização do *Kern River Oil Field*. (Fontes: (A) <http://www.ezilon.com> e (B) google maps).

As imagens adquiridas em radiância foram atmosféricamente compensadas utilizando a adaptação do *In-Scene Atmospheric Compensation algorithm* (Johnson & Young, 1998) do

software ENVI 5.1, e convertidas para emissividade com o algoritmo *Emissivity Normalization* (Hook et al., 1992). As imagens de emissividade geradas foram então processadas com a transformada *wavelet* e Análise de Componentes Independentes (ACI).

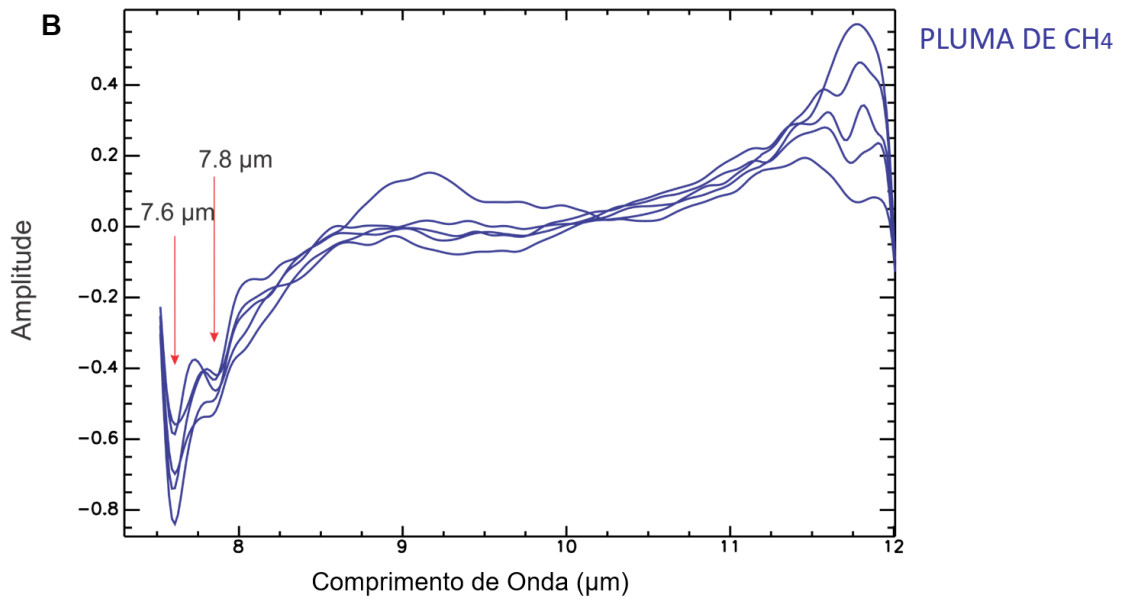
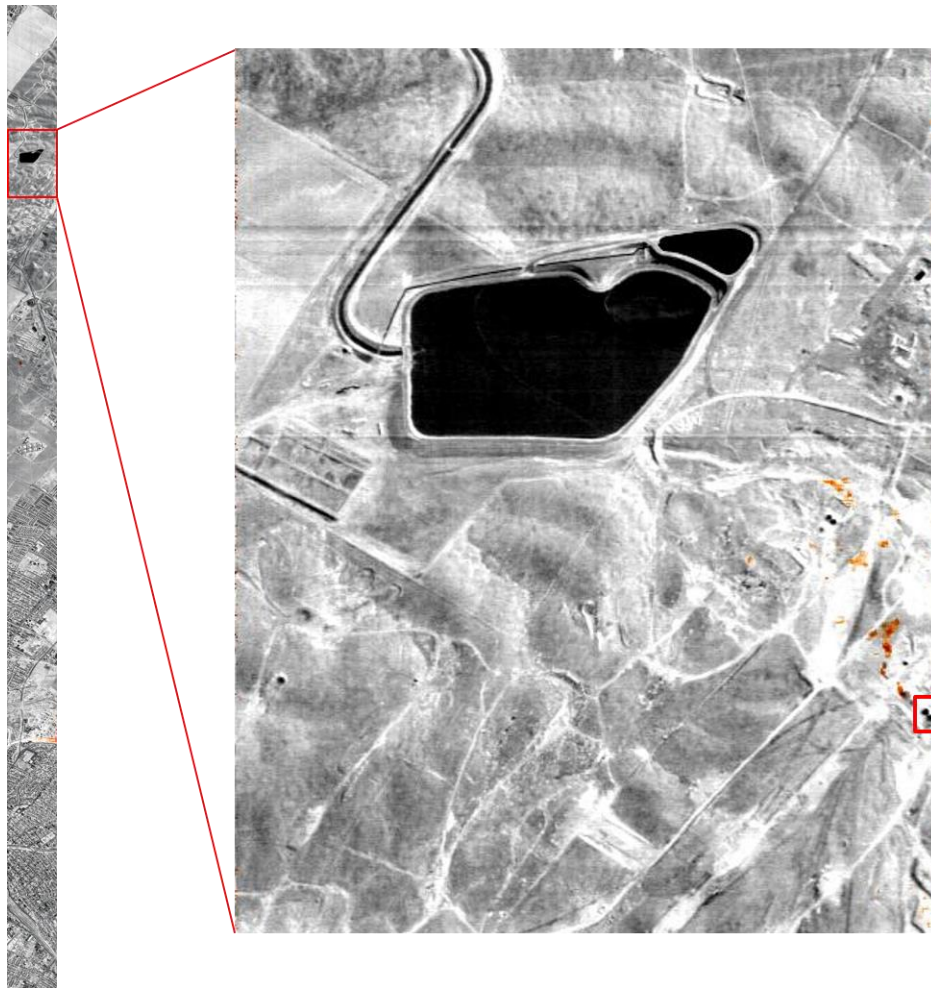
A transformada *wavelet* é uma ferramenta que permite a decomposição do sinal de entrada em diferentes componentes nos domínios de tempo e frequência (Walczak et al. 2002; Zhang et al., 2005). Esta característica faz das funções *wavelet* ferramentas poderosas de processamento de sinais, comumente aplicadas para a eliminação de ruídos, separação de componentes no sinal e identificação de singularidades na imagem (Scafutto et al, 2015). Neste estudo foi utilizada uma função *wavelet* desenvolvida em parceria com o Dr. Neil Pendock (*Geospectral Imaging Ltda.*) com o objetivo de realçar o sinal da pluma na imagem. Esta função consiste na segunda derivada da ordem Gaussiana (e.g. DOG – Muraki, 1995), decompondo o sinal em 9 componentes. A imagem final resulta da soma das componentes 3 e 6, sendo as demais componentes descartadas.

A Análise de Componentes Independentes (ACI - Héraul, Juttens & Ans, 1985; Hyvarinem et al, 2001) é uma técnica estatística utilizada para rearranjar dados multivariados, de forma a revelar componentes subjacentes na imagem que são ao mesmo tempo estatisticamente independentes e não gaussianas (Comon, 1994). A técnica consiste, basicamente, no realce e separação dos sinais originais (e.g. alvos na cena) a partir de uma mistura de sinais (e.g. misturas de sinais contidas nos pixels com diversos alvos), sem ter qualquer informação acerca da matriz de mistura ou das fontes dos sinais originais (Cardoso, 1998). Neste estudo, o software ENVI 5.1 foi utilizado para a aplicação da ACI nas bandas dentro do intervalo de 7.51 – 7.96 μm da imagem gerada com a transformada *wavelet*, a fim de realçar o sinal do gás para o mapeamento da pluma de CH_4 na imagem. Ao final, um filtro de mediana (3x3) foi aplicado à Componente Independente selecionada para a suavização do ruído na imagem.

3. Resultados e Discussão

A aplicação da transformada *wavelet* juntamente com a ACI conseguiu mapear com definição as plumas de metano provenientes dos tanques de armazenamento (Figura 2). Os *endmembers* do CH_4 e *background* foram separados, e os pixels contendo a assinatura do gás foram realçados na imagem. Apesar de informações de direção e intensidade do vento no dia do levantamento não serem disponibilizadas, nota-se que as plumas mapeadas se dispersam na mesma direção. Analisando os gráficos com as assinaturas espectrais extraídas ao longo das plumas, pode-se observar que as feições de absorção do metano em 7.6/7.7 μm e 7.8/7.9 μm foram isoladas e realçadas, e o ruído da imagem foi significativamente reduzido.

Apesar dos resultados apresentados serem preliminares, pode-se dizer que a técnica de detecção aqui investigada apresenta elevado potencial par a detecção remota de plumas de CH_4 e, possivelmente, outros gases. Em comparação com os estudos de Tratt et al. (2014) e Hulley et al. (2016), os quais desenvolveram algoritmos complexos para a detecção do gás, os resultados apresentados demonstram que emissões de metano podem ser identificadas e mapeadas com técnicas mais simples e acessíveis.



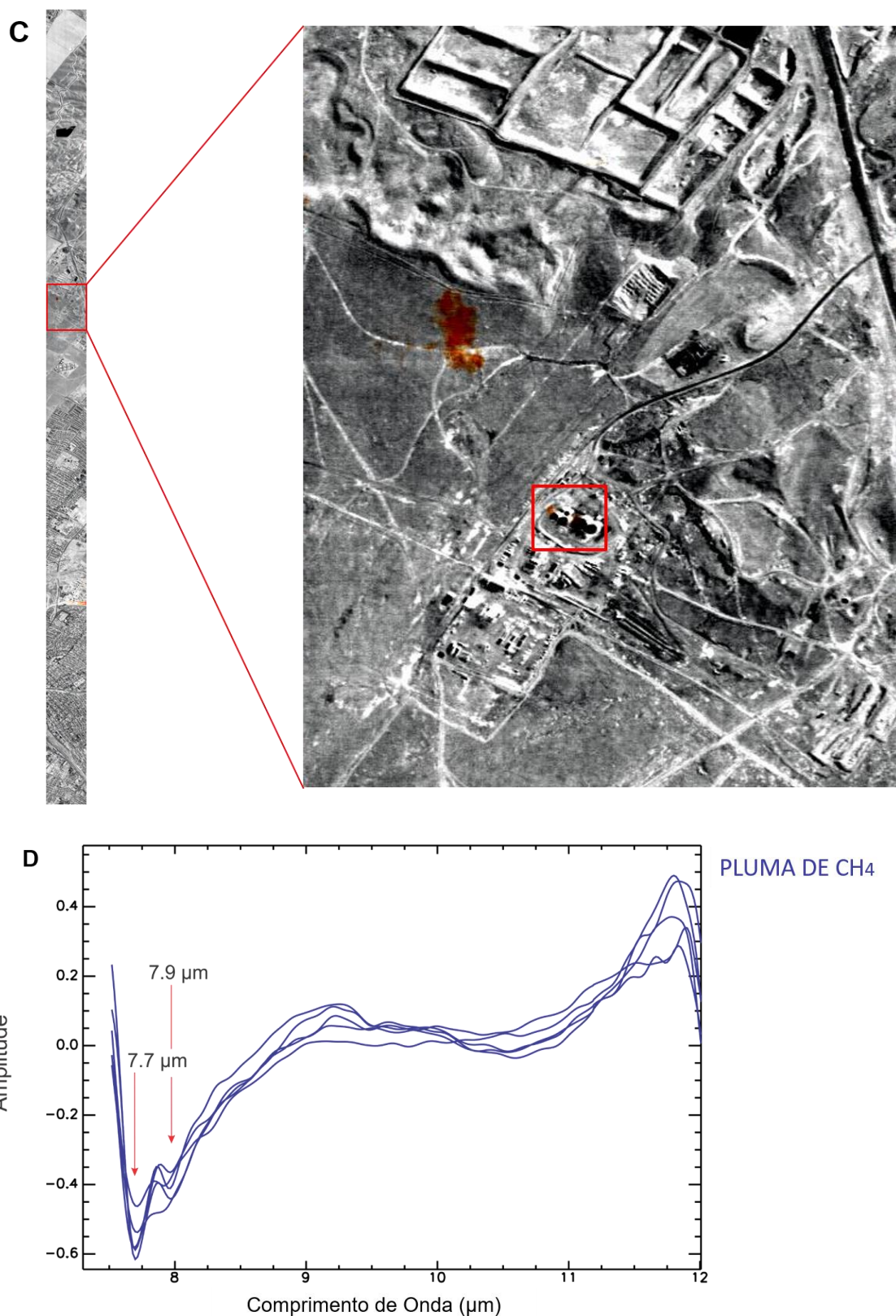


Figura 2. Detecção da pluma de metano nas regiões (A) e (C) na imagem Hytes, obtida sobre *Kern River Oil Field* (CA-EUA). Pixels em laranja e vermelho indicam a presença do metano (CH_4). (B) e (D) apresentam a assinatura espectral extraída de 5 pixels ao longo das plumas, nas regiões A e B, respectivamente. Os quadrados vermelhos na imagem ampliada indicam as fontes de emissão do CH_4 (e.g. tanques de armazenamento).

4. Conclusões

Os resultados preliminares apresentados demonstram o grande potencial de sensores termais hiperespectrais aerotransportados para a detecção remota direta de plumas de metano na superfície. A elevada resolução espectral do sensor associada à transformação *wavelet* permitiu o realce da assinatura espectral do CH₄, bem como a diminuição significativa do ruído na imagem. A Análise de Componentes Independentes permitiu a separação entre os *endmembers* do *background* e do gás, permitindo assim o destaque dos pixels com a assinatura do CH₄ e por consequência, o mapeamento detalhado das plumas. As técnicas aqui apresentadas ainda estão sendo estudadas e outras linhas de voo estão sendo processadas e analisadas. De maneira geral podemos concluir que as técnicas de *wavelets* e ACI podem ser aplicadas de forma eficaz para a detecção de fontes de emissões fugitivas de metano em instalações petrolíferas, auxiliando a diminuir as perdas de produção e refinando as estimativas de contribuição deste gás no balanço global.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a FAPESP (Processo No. 2015/19842-7) pelo suporte e a Neil Pendock pelo auxílio e colaboração na elaboração da função *wavelet* utilizada nesta pesquisa.

6. Referências Bibliográficas

- Barnhouse Jr, W. D. **Methane Plume Detection Using Passive Hyper-Spectral Remote Sensing**. 2005. Doctoral dissertation, Bowling Green State University.
- Bradley, E. S., Leifer, I., Roberts, D. A., Dennison, P. E., & Washburn, L. Detection of marine methane emissions with AVIRIS band ratios". **Geophysical Research Letters**, v.38, n. 10, 2001.
- Cardoso, J.-F. Blind signal separation: statistical principles. **Proceedings of the IEEE**, v.86, n.10, p2009-2025, 1998.
- Comon, P. Independent component analysis, a new concept? **Signal processing**, v.36, n.3, p.287-314, 1994.
- Dlugokencky, E. J., Nisbet, E. G., Fisher, R., & Lowry, D. Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, p. 2058-2072, 2011
- Etiopie, G. Natural emissions of methane from geological seepage in Europe. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 1430-1443, 2009
- Hausamann, Dieter; Zirnig, Werner; Schreier, Gunter. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. **Earth Observation Magazine**, v. 11, n. 3, 2002.
- Heasler, P., Posse, C., Hylden, J., & Anderson, K. Nonlinear bayesian algorithms for gas plume detection and estimation from hyper-spectral thermal image data. **Sensors**, v.7, n.6, 905-920, 2007.
- Hérault, J., Jutten, C., & Ans, B. Détection de grandeurs primitives dans un message composite par une architecture de calcul neuromimétique en apprentissage non supervisé. **Paper presented at the 10^o Colloque sur le traitement du signal et des images**, FRA, 1985.
- Hook, S.J., Eng, B.T., Gunapala, S., Hill, C., Johnson, W.R., Lamborn, A.U., Mouroulis, P., Mumolo, J., Paine, C., Realmuto, V.J., Wilson, D.W. QWEST and HyTES: two new hyperspectral thermal infrared imaging spectrometers for earth science. **In: SET-151 Specialist Meeting on Thermal Hyperspectral Imagery**, NATO-RTO, Brussels, 2009.

Hulley, G. C., Duren, R. M., Hopkins, F. M., Hook, S. J., Vance, N., Guillevic, P. & Chazanoff, S. L. High spatial resolution imaging of methane and other trace gases with the airborne Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer (HyTES). **Atmospheric Measurement Techniques**, v.9, n.5, p. 2393-2408, 2016.

Hyvärinen, A., Karhunen, J., & Oja, E. **Independent component analysis** (Vol. 46): John Wiley & Sons. 2004.

Kamieniak, J., Randviir, E.P., Banks, C.E. The latest developments in the analytical sensing of methane. **Trends in Analytical Chemistry**, v.73, p.146–157, 2015.

Kastek, M., Piątkowski, T., Dulski, R., Chamberland, M., Lagueux, P., & Farley, V. Method of gas detection applied to infrared hyperspectral sensor. **Photonics Letters of Poland**, v. 4, n.4, p.146-148, 2012.

Krier, A. & Sherstnev, V.V. Powerful interface light emitting diodes for methane gas detection. **Journal of Physics**, v.33, n.2, p.101-106, 2000.

Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunio, M., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J. & Cameron-Smith, P. Three decades of global methane sources and sinks. **Nature Geoscience**, v.6, n.10, p.813–823, 2013.

Lassey, K. R., Lowe, D. C., & Smith, A. M. The atmospheric cycling of radiomethane and the " fossil fraction" of the methane source. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.7, n.8, p 2141-2149, 2007.

Messinger, D. W., Salvaggio, C., & Sinisgalli, N. M. Detection of gaseous effluents from airborne LWIR hyperspectral imagery using physics-based signatures. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, v.17, n.4, p801-812, 2007.

Miller, S. M., Wofsy, S.C., Michalak, A.M., Kort, E. A., Andrews, A. E., Biraud, S.C., et al. Anthropogenic emissions of methane in the United States. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n.50, p. 20018–20022, 2013.

Niederer, J. M. G. **The Infrared Spectrum of Methane**, Dissertation ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich), Zürich, 2011.

Roberts, D.A., Bradley, E.S., Cheung, R., Leifer, I., Dennison, P.E., Margolis, J.S. Mapping methane emissions from a marine geological seep source using imaging spectrometry. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p592–606, 2010.

Salem, F., Kafatos, M., El-Ghazawi, T., Gomes, R., Yang, R. Hyperspectral Image Assessment of Oil-Contaminated Wetland. **International Journal of Remote Sensing**, v.26, n.4, p.811–821, 2005.

Thorpe, A. K., Roberts, D. A., Dennison, P. E., Bradley, E. S., & Funk, C. C. Point source emissions mapping using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). In: **SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics**, p. 839013-839013, 2012.

Thorpe, A.K., Roberts, D.A., Bradley, E.S., Funk, C.C., Dennison, P.E., Leifer, I. High resolution mapping of methane emissions from marine and terrestrial sources using a Cluster-Tuned Matched Filter technique and imaging spectrometry. **Remote Sensing of Environment**. v.134, p.305–318, 2013.

Thorpe, A.K., Frankenberg, C., Roberts, D.A. Retrieval techniques for airborne imaging of methane concentrations using high spatial and moderate spectral resolution: Application to AVIRIS. **Atmospheric Measurement Techniques**, v.7, p.491–506, 2014.

Tratt, D.M., Buckland, K.N., Hall, J.L., Johnson, P.D., Keim, E.R., Leifer, I., Westberg, K., Young, S.J. Airborne visualization and quantification of discrete methane sources in the environment. **Remote Sensing of Environment**, v.154, p.74–88, 2014.

Walczak, B., Bouveresse, E., Massart, D.L. Standardization of near-infrared spectra in the wavelet domain. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.36, p.41-51, 1997.

Walsh, S., Chilton, L., Tardiff, M., & Metoyer, C. Effect of the temperature-emissivity contrast on the chemical signal for gas plume detection using thermal image data. *Sensors*, v.8, n.10, p.6471-6483, 2008.

Zhang, X., Younan, N.H. and O'Hara, C.G. (2005). Wavelet domain statistical hyperspectral soil texture classification. **Geoscience and Remote Sensing**, v.43, n.3, p. 615-618, 2005.