

Caracterização de microexsudações de hidrocarbonetos na bacia do Tucano Norte (BA) por geoestatística, classificação hiperespectral e redes neurais

Talita Lammoglia¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Raimundo Almeida Filho²

¹Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{talita.lammoglia, beto}@ige.unicamp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 – 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
rai@ltid.inpe.br

Abstract. Based on geostatistic analysis of soil gas data and on digital processing of images acquired by the sensors/satellites ETM+/Landsat and ASTER/Terra, this study discusses the characterization of hydrocarbon microseepage areas in the Tucano Norte Sedimentary Basin. Results of ETM+ data processing through principal components analysis, and those for the ASTER data through the Spectral Angle Mapper and Mixture Tuned Matched Filtering techniques, are considerably consistent to a previously defined model for anomalous soil gas surface expression. The microseepage characterization also included the ASTER/Terra images classification through three different neural network systems (Fuzzy Clustering, Radial Basis Functional Link Network and Probabilistic Neural Network), which brought up satisfactory results, since they included gasometrical anomaly points used for training the data.

Palavras chave: microexsudações, hidrocarbonetos, classificação hiperespectral, redes neurais.

Key words: hydrocarbon microseepage, spectral classification, neural network.

1. Introdução

Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas no auxílio à pesquisa de hidrocarbonetos podem ter enfoques em escala regional ou em escala de detalhe. Na escala regional explora-se a possibilidade de visão sinóptica de extensas áreas proporcionada pelas imagens orbitais. Informações extraídas dessas imagens (lineamentos estruturais, rede de drenagem) podem ser integradas com informações derivadas de outras fontes, como mapas geológicos, dados geoquímicos (e.g., gasometria), geofísicos (gravimetria, magnetometria, sísmica), etc, com o objetivo de reconhecer áreas potencialmente favoráveis à ocorrência de hidrocarbonetos. Na escala de detalhe têm sido obtidos resultados interessantes através de estudos baseados na detecção espectral de feições resultantes da interação do sistema solo-planta com os hidrocarbonetos exsudados.

Neste contexto, buscando uma melhor caracterização de anomalias gasométricas superficiais e avaliação do potencial de novas metodologias para reconhecê-las, o presente trabalho teve como objetivo a caracterização espectral de regiões com microexsudações de hidrocarbonetos na Bacia Tucano Norte – BA. Essa caracterização foi efetuada por estudo geoestatístico de dados geoquímicos de superfície (gasometria), processamento clássico e hiperespectral de imagens dos sensores/satélites ETM+/Landsat e ASTER/Terra, bem como pela classificação dos dados ASTER por redes neurais.

2. Área de Estudo - Bacia do Tucano Norte (BA)

A área de estudo localiza-se na Bacia Tucano Norte, nordeste do estado da Bahia (Figura 1). Na forma de um semi-graben, tal bacia pertence ao rifte do Recôncavo-Tucano-Jatobá, formado durante os estágios iniciais da abertura do Atlântico sul no Cretáceo Inferior (Magnavita *et al.* 2003).

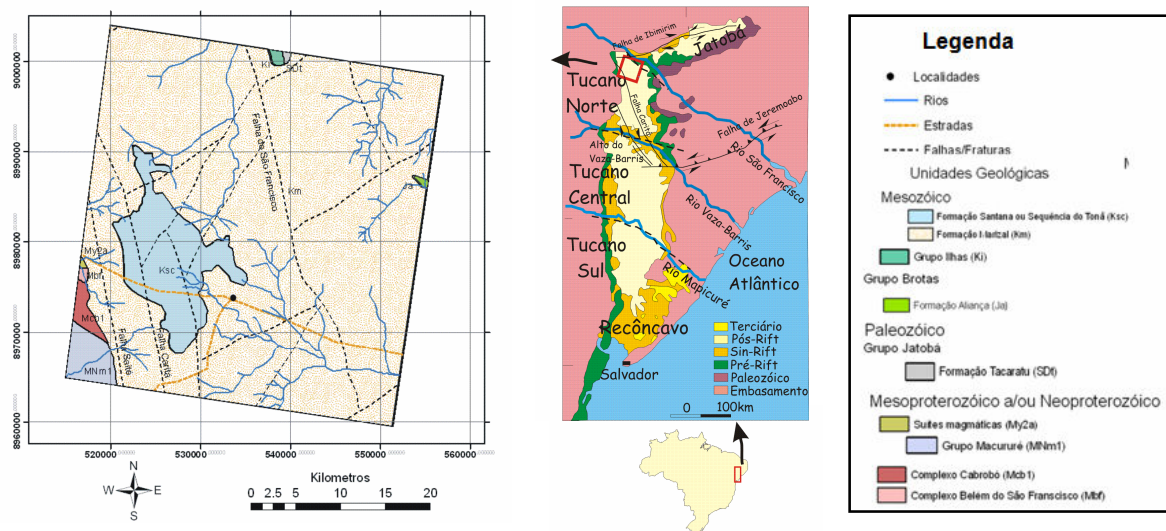


Figura 1: Localização e mapa geológico da área de estudo (adaptado de CPRM (2000) e Magnavita *et al.* (2003)).

Os litotipos mais expressivos na área de estudo pertencem à Formação Marizal e à Seqüência Tonã. A Formação Marizal inclui conglomerados e arenitos, além de argilitos sílticos, calcários e folhelhos betuminosos. A seqüência do Tonã, depositada em conformidade sobre a Formação Marizal, representa uma seqüência de intercalações de arenitos e calcário silicificado (Rolim 1984, Almeida-Filho 2002).

3. Modelo Teórico de detecção de exsudações de hidrocarbonetos

Exsudações de hidrocarbonetos são “expressões superficiais do escape de hidrocarbonetos, provenientes de uma fonte em sub-superfície, através de um caminho permeável que possibilite a sua fluência em função da flutuabilidade” (Clarke & Cleverly 1991). Essas feições em superfície constituem evidências da presença de reservatórios de óleo e/ou gás em sub-superfície, todavia não são suficientes para que se possa classificar uma área como economicamente viável ou não (Schumacher 2002).

As microexsudações de hidrocarbonetos, basicamente compostas por metano (CH₄), etano (C₂H₆), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀) e pentano (C₅H₁₂), interagem com o material da coluna estratigráfica e geram em superfície uma ampla variedade de alterações de natureza física, química, mineralógica, botânica e microbiológica. Dentre essas, as de maior interesse na presente pesquisa são:

Bleaching: descoloração de materiais limoníticos (rochas e solos) devido à atuação de soluções ácidas/redutoras que promovem a remoção do íon férrico (Fe³⁺) presente nesses materiais. O

bleaching pode ser detectado observando-se o decréscimo acentuado do gradiente de reflectância na resposta espectral da rocha/solo na região do visível do EEM.

Minerais com feições espectrais diagnóstica – argilo-minerais: a produção de CO₂, H₂S e ácidos orgânicos resultantes da oxidação de hidrocarbonetos próximos à superfície gera um ambiente redutor e levemente ácido capaz de promover alterações diagenéticas de feldspatos em minerais do grupo das argilas, incluindo caulinita, illita e clorita (Schumacher 2002). A caulinita pode ser caracterizada espectralmente, pois apresenta feições de absorção diagnósticas na região do SWIR (1,40-1,42µm e 2,162-2,206µm), além de feições de absorção acessórias em 2,312, 2,350 e 2,380µm.

Anomalias Geobotânicas: a cobertura vegetal é sensível à toxidez do solo por hidrocarbonetos e compostos associados. Essa sensibilidade pode ser observada na resposta espectral da vegetação, principalmente no que se refere àquela relacionada ao pigmento clorofila (com manifestações na região do visível), a estrutura celular (com manifestações na região do infravermelho próximo) e a quantidade de água na planta (com manifestações na região do infra-vermelho de ondas curtas) (Van der Meer *et al.* 2002).

De acordo com o modelo prospectivo adotado para o estudo, foram considerados alvos de interesse: (i) áreas com alta concentração de hidrocarbonetos em solo; (ii) áreas onde a vegetação fotossinteticamente ativa está ausente ou degradada; (iii) áreas onde superfícies ricas em Fe-férrico são ausentes ou são pouco expressivas; (iv) áreas com indicações de superfícies ricas em Fe-ferroso destacáveis do ‘background’; (v) áreas indicativas de concentração de argilas, particularmente de em caulinita.

4. Materiais e Métodos

4.1 Dados de Geoquímica de Hidrocarbonetos Leves.

Para esse trabalho contou-se com mais de seiscentas determinações de metano, etano, propano, butano e pentano em amostras de solo obtidas na área de estudo pela Petrobras (Babinski *et al.* 1993). Esses dados foram aqui utilizados de três formas básicas: (i) para avaliação da distribuição espacial de regiões com alta concentração de hidrocarbonetos em solo (ii) como pontos de treinamento para a avaliação de assinaturas espectrais em imagens de sensoriamento; (ii) na aferição e validação dos resultados obtidos da interpretação dos dados de sensoriamento remotos, visando comprovar se as informações discriminadas nas imagens têm sua origem relacionada aos processos de microexsudação de hidrocarbonetos.

Objetivando entender a distribuição espacial dos diferentes hidrocarbonetos leves e para que essa distribuição possa ser utilizada de maneira confiável na confrontação com informações extraídas das imagens, foi necessário processá-los através de técnicas geoestatísticas, incluindo análise variográfica, modelagem de semi-variograma, validação cruzada e krigagem (Deustsch 2002).

4.2 Dados do Sensor ETM+/Landsat-7

A cena ETM+ utilizada nesse trabalho (ponto/órbita 216/66) foi adquirida em 30/setembro/1999. O objetivo do uso destas imagens foi a detecção, dentro das possibilidades espectrais do sensor ETM+, de coberturas ricas em vegetação, compostos de ferro férrico e ferroso, argilas e carbonatos. Optou-se por abordar o processamento de dados ETM+ através da Análise por Principais Componentes (APC), particularmente na sua versão de Principais Componentes Seletivas (Chavez & Kwarteng 1989). As bandas utilizadas para geração de pseudo-razões e realce das feições de interesse foram: TM4/TM3 (vegetação), TM3/TM1 e TM3/TM2 (Fe³⁺ (goethita e hematita)), (TM2/TM3) + (TM5/TM4) (Fe²⁺) (Prost 1980, Hunt 1991).

4.3. Dados do Sensor ASTER/Terra

Os dados ASTER foram adquiridos em 14/maio/2001, com nível de processamento 1B. Sobre esses dados foram aplicados os seguintes processamentos:

Pré-Processamento e Classificação hiperespectral de Dados ASTER

Para minimização do efeito ‘cross-talk’, que afeta as bandas do SWIR do sensor ASTER, foi aplicado, sobre os dados originais nível 1B, um algoritmo de correção disponibilizado pelo ERSDAC (2001). A conversão dos dados ASTER em valores de reflectância aparente na superfície e a correção atmosférica foram feitas utilizando-se o software *Atmospheric Correction Now* (ACORN), que envolve um cálculo da transferência radiativa baseada no modelo MODTRAN-4 (Imspec 2001). Visando evitar interferência da cobertura vegetal ou de nuvens, ou mistura entre materiais, foi aplicada uma máscara sobre as imagens. A classificação hiperespectral dos dados foi realizada com base em diferentes *endmembers* (derivados da imagem ou de amostras de campo) e efetuada a partir de um procedimento semi-automático, baseado, inicialmente, no uso seqüencial das técnicas *Minimum Noise Fraction* (MNF) e *Pixel Purity Index* (PPI) aplicadas às 9 bandas do ASTER convertidas para reflectância. A classificação hiperespectral propriamente dita foi procedida através dos algoritmos *Spectral Angle Mapper* (SAM), na escala do pixel, (Kruse *et al.* 1993) e *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF), na escala do sub-pixel (Boardman 1998).

Classificação de Dados ASTER por Redes Neurais

A classificação digital de dados ASTER por redes neurais é uma ferramenta útil para geração de mapas de favorabilidade de bens minerais, incluindo acumulações de hidrocarbonetos, uma vez que tem por objetivo reconhecer padrões ocultos em pixels da cena, considerando sua resolução espectral de nove bandas e a resolução espacial de 15 metros. As redes neurais permitem que os dados ASTER sejam processados na sua forma bruta (nível 1B), sem necessidade de qualquer pré-processamento. Para esta classificação utilizou-se o programa GeoXplore (Looney & Yu 2000), que trabalha em combinação com o software ArcGIS, e seus três sistemas de treinamento e classificação de dados: *Fuzzy Clustering* (não supervisionado), *Radial Basis Functional Link Network* (RBFLN) e *Probabilistic Neural Network* (PNN) (supervisionados). Após o treinamento baseado nos dados de gasometria, qualquer destes três sistemas pode processar os vetores novos e desconhecidos a partir de fontes similares, e reconhecer as classes às quais pertencem.

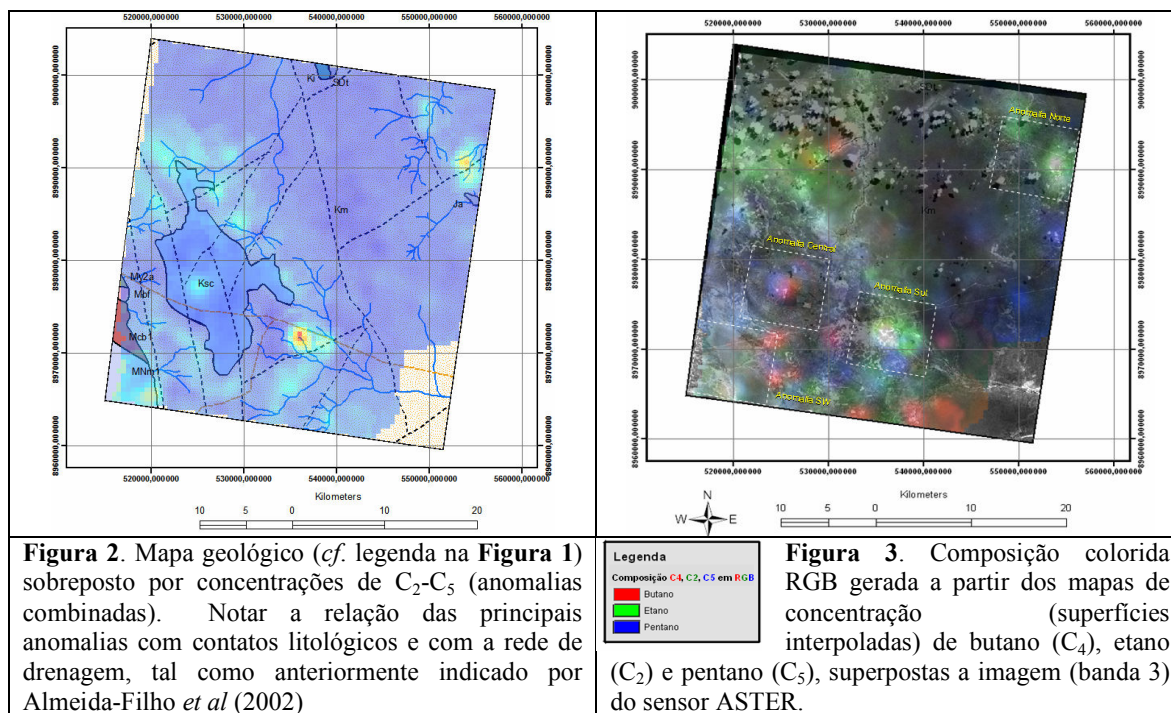
Previamente à classificação efetuou-se a fuzzificação dos dados de treinamento através da função de pertinência fuzzy do tipo *large* (Looney & Yu 2000). Cada um dos sistemas de classificação utilizados apresentou um resultado diferente. Assim, foram obtidos três resultados matriciais do processamento (*unique condition raster*) distintos para cada área processada, os quais foram simbolizados pelo método de quantis.

5. Resultados & Discussões

5.1. Resultados da krigagem de dados de gasometria

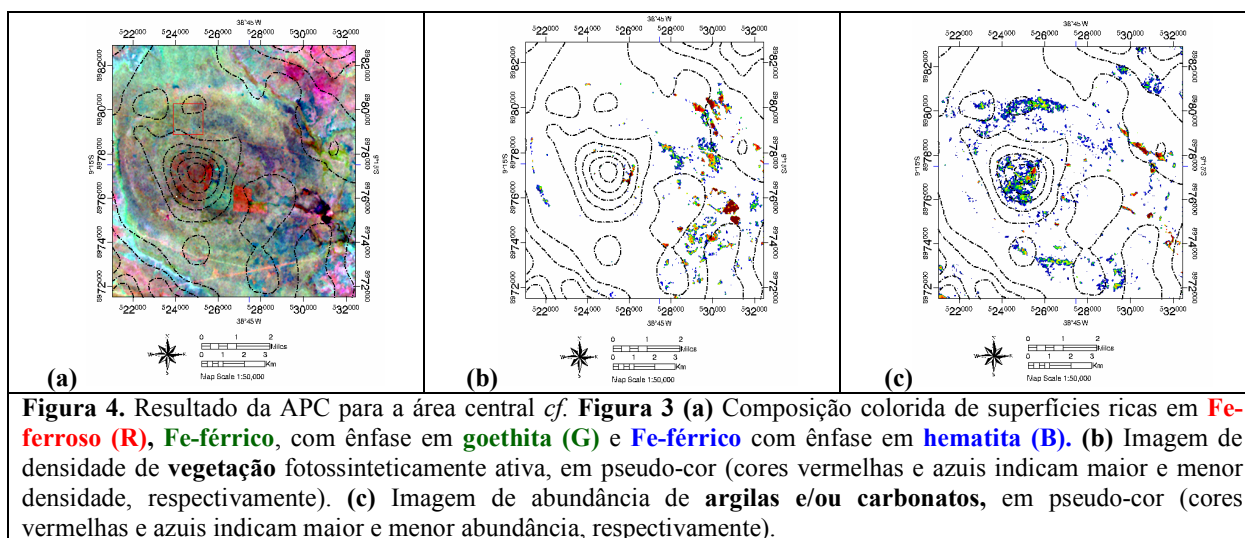
Os resultados da krigagem para os dados gasométricos (etano + propano + butano + pentano) sobrepostos ao mapa geológico da área, e a composição RGB de imagens indicativas de concentrações de hidrocarbonetos sobrepostas a cena ASTER, podem ser observados nas **Figuras 2 e 3**, respectivamente. Podem ser observadas duas anomalias expressivas: a “anomalia norte” e a “anomalia sul”. Há ainda anomalias menos expressivas, como nas regiões sudoeste e central. É interessante observar que, a exceção da anomalia central, praticamente todas as ocorrências

anômalas de HCs, sejam singulares ou combinadas, estão associadas a drenagens ou a contatos litológicos.



5.2. Resultados do processamento de Imagens ETM+/LANDSAT-7

Os resultados para todas as situações analisadas indicam que há uma marcante coincidência entre as zonas anômalas em C₂-C₅ e áreas ricas em Fe-ferroso, ricas em argilas e/ou carbonatos, pobres em ferro férrico e com cobertura vegetal rala – o que corrobora o modelo teórico de detecção de microexsudações de hidrocarbonetos formulado para a área de estudo. Os resultados para a área central se encontram na **Figura 4**.

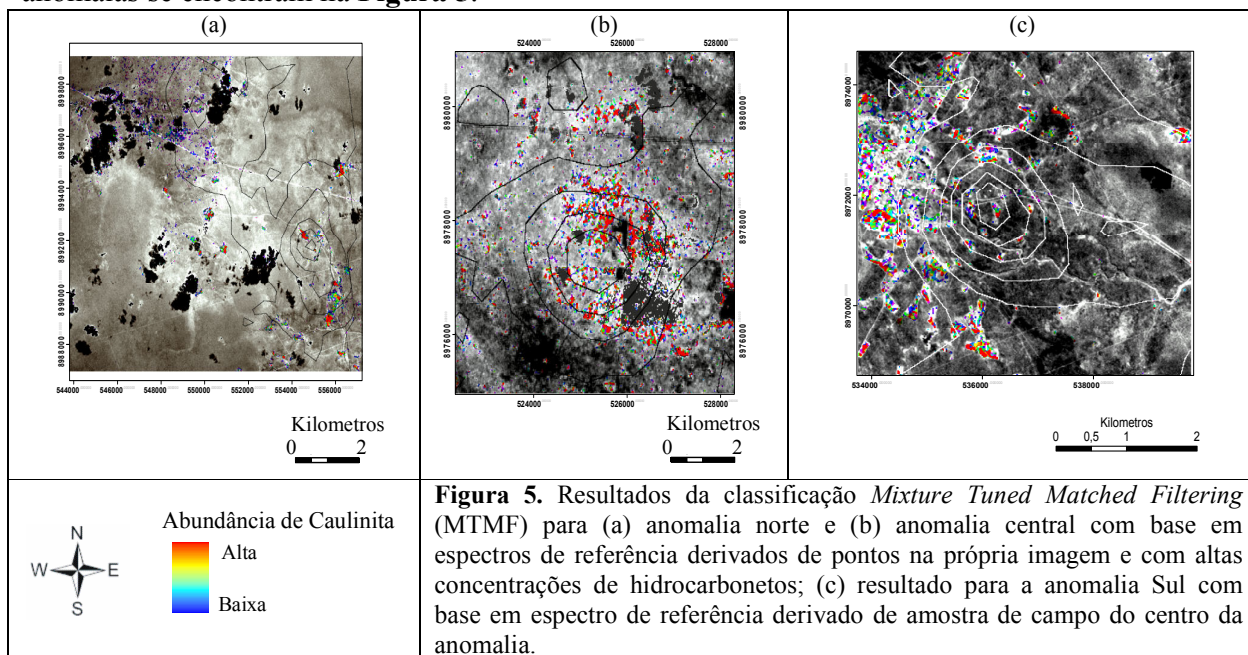


5.3. Resultados do Processamento de Imagens ASTER/Terra

- *Classificação Hiperespectral*

Visando melhor caracterizar a ocorrência de minerais do grupo da caulinita, a classificação hiperespectral foi procedida em imagem obtida pelo sensor ASTER. Ela foi realizada em três das áreas indicadas na **Figura 3**, tendo como base três tipos de *endmembers*: (i) *endmember* derivado estatisticamente da própria imagem; (ii) *endmember* derivado de locais específicos na imagem com alta concentração de hidrocarbonetos indicada pela geoquímica; e (iii) *endmember* derivado de amostra coletada no centro da anomalia sul e medida em laboratório com o espectrorradiômetro FieldSpec-FR. Após discriminação e seleção dos espectros de referência as sub-áreas foram classificadas pelas técnicas SAM e MTMF.

Os resultados evidenciaram razoável concordância nas respostas obtidas pelos dois diferentes métodos, independente dos *endmembers* utilizados. Todas as metodologias adotadas incluíram genericamente as áreas caracterizadas anômalas pelo processamento Landsat. A classificação MTMF por *endmember* de referência apresentou resultados mais precisos, uma vez que gerou mapas de distribuição de caulinita mais restritivos, porém coincidentes com as anomalias de gasometria. Os resultados da classificação MTMF por *endmembers* de referência para as regiões anômalas se encontram na **Figura 5**.

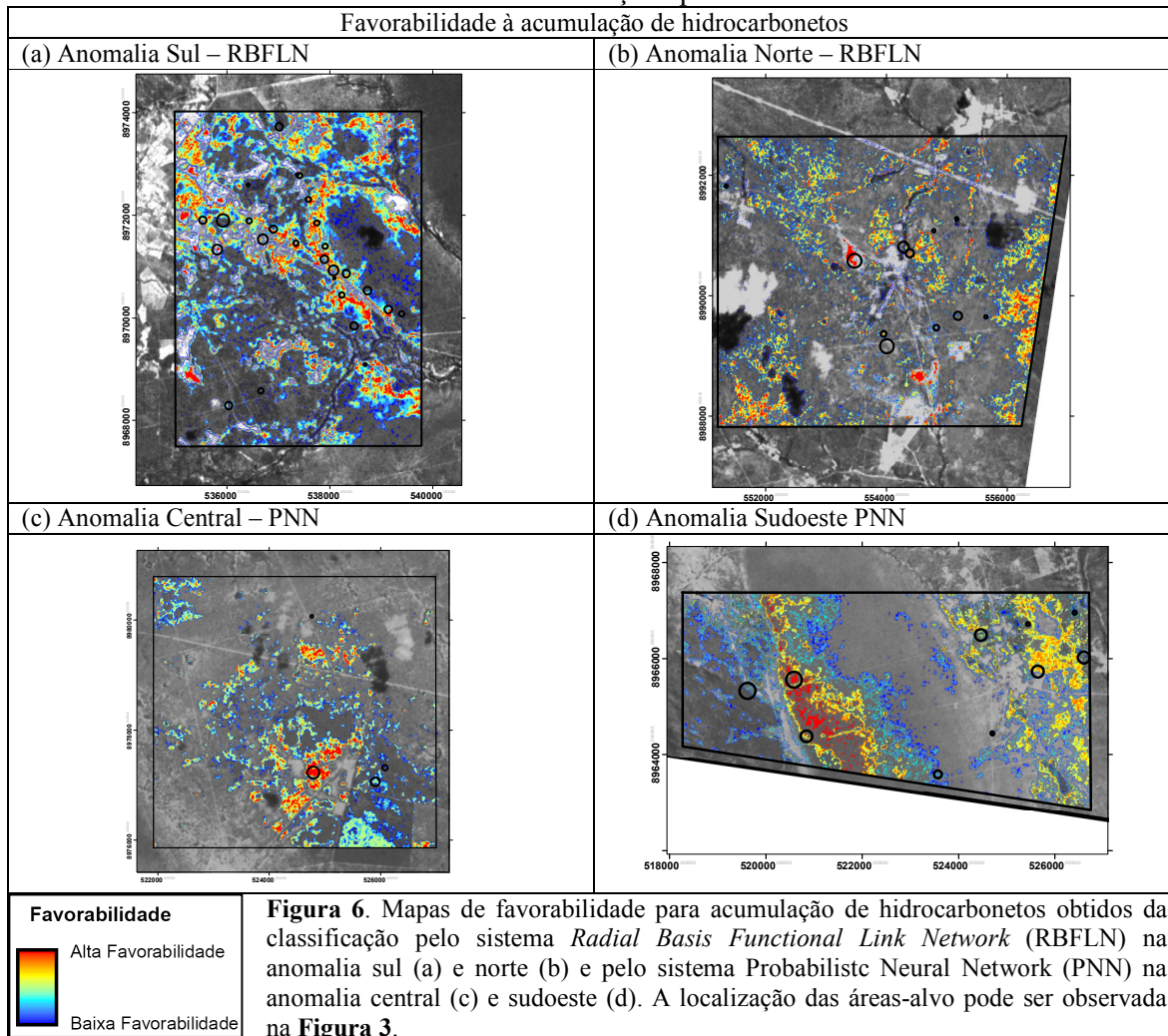


- *Classificação por Redes Neurais*

É relevante destacar que a experiência com as redes neurais do GeoXplore, da forma como aqui realizado, é pioneira, motivo pelo qual a compreensão do impacto da modificação de parâmetros de entrada nos resultados deve ser considerada com cautela. Os mapas de favorabilidade resultantes da classificação pelos sistemas *Probabilistic Neural Network* (PNN) e *Radial Basis Functional Link Network* (RBFLN), apresentaram melhor discriminação dos pontos de acumulações de hidrocarbonetos detectados pela gasometria, em relação à classificação *Fuzzy Clustering*.

As áreas de alta favorabilidade de acumulação de hidrocarbonetos indicadas pelas redes neurais incluem, particularmente, as cabeceiras das drenagens, áreas conhecidas como favoráveis à

concentração de hidrocarbonetos transportados pelo fluxo de água subterrânea. Na **Figura 6** se encontram os resultados das melhores classificações para cada subárea estudada.



6. Conclusões

Os resultados das técnicas estatísticas aplicadas aos dados de gasometria, com ênfase à krigagem, mostraram-se eficazes e possibilitaram a correlação das acumulações de hidrocarbonetos com os lineamentos estruturais, contatos litológicos e rede de drenagem.

A análise por principais componentes das imagens ETM+/Landsat, em acordo com o modelo hipotético estabelecido, evidenciou que as áreas discriminadas como anômalas pela gasometria apresentam cobertura vegetal rala, ausência de compostos ricos em Fe-férrico, presença de compostos ricos em Fe-ferroso, e concentração de argilas. A identificação da caulinita, mineral de particular interesse, foi possível a partir da classificação hiperespectral dos dados do sensor ASTER, considerando sua resolução espectral com 9 bandas no espectro refletido. Os melhores resultados da classificação hiperespectral, ou seja, os que ao mesmo tempo foram restritivos e incluíram as áreas geoquimicamente anômalas, foram obtidos pelo método *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) utilizando-se *endmembers* de referência.

A classificação da cena ASTER por redes neurais, realizada através do GeoXplore, apresentou resultados robustos e comparáveis aos resultados das classificações espectrais, em especial aquelas baseadas nos sistemas *Probabilistic Neural Network* (PNN) e *Radial Basis Functional Link Network* (RBFLN). Tal classificação incluiu, majoritariamente, as áreas discriminadas como anômalas pela gasometria e excluiu feições como nuvens e respectivas sombras. Essas classificações apresentaram, em áreas restritas, correlação da alta favorabilidade à acumulação de hidrocarbonetos com feições estruturais e rede de drenagem. Assim, o uso das redes neurais, ainda que de forma experimental, mostrou ser uma metodologia adicional, rápida, barata e eficiente para caracterização de feições em imagens ASTER relacionadas à microexsudações de hidrocarbonetos.

8. Referências

- Almeida-Filho R. 2002. Remote detection of hydrocarbon microseepage areas in the Serra do Tonã region, Tucano basin, Brazil. *Can. J. Remote Sensing*, 28 (6): 750–757.
- Babinski N.A., Santos R.C.R., Bueno G.V., Guimarães M.F., Freire A.F.M., Gouveia C.A.S., Almeida M.F., Volpan A.G. 1993. *Prospecção geoquímica de superfície (gasometria e microbiologia de petróleo) na bacia de Tucano Norte*. CENPES/SINTEP/MCT, 650–15.106. Relatório Não Publicado, 15 pp.
- Boardman J. W. 1998. Leveraging the High Dimensionality of AVIRIS Data for Improved Sub-Pixel Target Unmixing and Rejection of False Positives Mixture Tuned Matched Filtering. *AVIRIS Proceeding*, JPL Publication, pp.: 97-21.
- Chavez P.S. Jr. & Kwarteng. A.Y. 1989. Selective Principal Component Analysis Photogram. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55 (9): 1163-1169.
- Clarke R. H. & Cleverly R. W., 1991. Petroleum seepage and post accumulation migration. In: W. A. England e A. J. Fleet, (eds.) *Petroleum Migration*. Geol. Soc. Sp. Publ., Geological Society of London, 59, pp.: 265-271.
- CPRM & Serviço Geológico do Brasil. 2000. *Carta Geológica*. Escala 1:500000.
- Deutsch C.V. 2002. *Geostatistical Reservoir Modeling in Applied Geostatistical Series*. Oxford University Press, 376 pp.
- Earth remote sensing data analysis center (ERSDAC). 2001. *The Crosstalk Correction Software: User's Guide*. Mitsubichi Space Software Co. Ltd., 17 pp.
- Hunt G.A. 1991. *Geological applications of reflected and emitted multispectral data over lateritised Archean terrain in western Australia*. Dissertação de Doutorado, Open University, Milton Keynes, Reino Unido.
- Imspec. 2001. *ACORN User's Guide*. Analytical Imaging and Geophysics. Boulder, CO, USA, 64 pp.
- Iwasaki A., Fujisada H., Akao H., Shindou O., Akagi S. 2001. Enhancement of spectral separation performance for ASTER/SWIR. *Proceedings of SPIE*, The International Society for Optical Engineering, 4486, pp.: 42-50.
- Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. B., Heidebrecht K. B., Shapiro A. T., Barloon, P. J., e Goetz A. F. H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 44:145-163.
- Looney C.G. & Yu H. 2000. Special Software Development for Neural Network and Fuzzy Clustering Analysis in Geological Information Systems. *Geological Survey of Canada*, 34 pp.
- Magnavita L, Destro N., Carvalho M. S. S., Milhomen P. S., Souza-Lima W. 2003. Bacia de Tucano. *Fundação paleontológica PHOENIX*. Ano 5. n52. Disponível em http://www.phoenix.org.br/Phoenix52_Abr03.htm. Consultado em 16/05/06.
- Prost G. 1980. Alteration mapping with airborne multispectral scanners. *Economic Geology*, 75:894-906.
- Rolim J. L. 1984. *Estudo da Seqüência Clástica e Carbonática da Serra do Tonã Macururé, Estado da Bahia*. Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências, Univ. Fed. do Rio Grande do Sul, 155 p.
- Schumacher D. 2002. Hydrocarbons Geochemical Exploration for Petroleum In D. Schumacher e M.A. Abrams (eds) *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. AAPG, Memoir 66, pp.:184-204.
- Van der Meer F., Van Dijk P., Van der Werff H., Yang, H. 2002. Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. *Terra Nova*, 14 (1): 1-17.