

Utilização de técnicas de reconstrução topográfica com dados SRTM na análise de anomalias morfoestruturais em diferentes estágios de erosão

Delano Menecucci Ibanez^{1,2}
Raimundo Almeida-Filho²
Fernando Pellon Miranda³

¹ Threetek Soluções em Geomática
Rua México, 41 - 17º andar – Centro – Rio de Janeiro-RJ, Brasil
(delano@threetek.com.br)

² INPE, Caixa postal 515, São José dos Campos-SP, Brasil
(rai@dsr.inpe.Br)

³ Petrobras-CENPES, Ilha do Fundão, Q-7, Rio de Janeiro-RJ, Brasil
(fmiranda@petrobras.com.br)

Abstract. Using the three-point system in SRTM data, this article discusses the use of this topographic reconstruction technique to characterize morphostructural features in the Amazonas Sedimentary Basin. Under the Amazonian environmental conditions, structural features mostly are characterized by subtle combined arrangement of the drainage network and terrain morphology, with no clear expressions of the inclined bedrock strata. A resulting form-line surface structure map allows describing the forms of eroded morphostructural features. A more precise identification of these structural features is important because they may constitute potential structural traps controlling oil and gas accumulation in frontier exploration areas.

Palavras-chave: SRTM data, topography reconstruction techniques; three point method; Dados SRTM; técnicas de reconstrução topográfica; método dos três pontos.

1. Introdução

Na região do Rio Uatumã, Bacia Sedimentar do Amazonas (**Figura 1**), ocorrem configurações anômalas da rede drenagem indicativas de possíveis estruturas em subsuperfície (Miranda et al. 1994; Ibanez e Almeida-Filho, 2006). Tais feições são de interesse para a pesquisa de hidrocarbonetos, visto que podem ser causadas por flexuras de camadas sedimentares, constituindo evidências de potenciais trapas petrolíferas.

Duas linhas de abordagem se destacam no estudo de anomalias morfoestruturais de drenagem. A primeira delas, discutida em Soares e Fiori (1976) e Soares et al. (1982), tem sido empregada no Brasil, dentre outros por Miranda (1983) e Miranda e Boa Nova (1986). Adotando uma abordagem semi-quantitativa, ela compara quanto uma anomalia morfoestrutural identificada em imagens de sensoriamento remoto assemelha-se a modelos ideais de um domo ou de uma depressão estrutural, com base em fatores de confiabilidade e similaridade. A segunda abordagem, seguida por Aghassy e Berger (1981) e Berger (1994), analisa expressões geomórficas de estruturas dobradas, levando em consideração os elementos de drenagem, a declividade do terreno e o grau de exposição dessas estruturas à erosão.

Segundo o modelo de Berger (1994), anomalias morfoestruturais em estágio avançado de erosão caracterizam-se por inversão topográfica, com aparecimento de uma calha central e formação de assimetria convergente. Tal configuração, se analisada segundo o modelo de Soares et al. (1982), pode ser interpretada como uma depressão estrutural, sem interesse para a pesquisa de hidrocarbonetos.

Essa dúvida quanto a possível natureza de tais feições estruturais (se uma feição dômica ou uma depressão estrutural) pode ser dirimida pelo método de Berger (1994), através da utilização de modelos de elevação digital do terreno obtidos com dados da SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) (Rabus et al., 2003). Com o emprego de técnicas de reconstrução topográfica pelo método de três pontos, é possível diagnosticar a natureza da feição estrutural em subsuperfície causadora da anomalia de drenagem. Utilizando algumas anomalias morfoestruturais identificadas na área de estudo por Ibanez e Almeida-Filho (2006), este artigo mostra exemplos do emprego de técnicas de reconstrução topográfica a partir de dados SRTM na análise de anomalias morfoestruturais em diferentes estágios de erosão.



Figura 1. Localização da área de estudo na Bacia Sedimentar do Amazonas, a leste da cidade de Manaus.

2. Expressões Geomórficas de Estruturas Arqueadas

Visando à reconstrução topográfica de estruturas dobradas, Berger (1994) estabeleceu uma configuração básica para os elementos de drenagem e declividade do terreno, levando em consideração o estágio de erosão. Segundo aquele autor, os elementos básicos da evolução da rede de drenagem associada a essas estruturas podem ser descritos como indicados na **Figura 2**, mencionados a seguir:

- a) Drenagens marginais subseqüentes: representam os maiores elementos de drenagem, que ajustam sua forma em volta do perímetro do domo, configurando um padrão circular;
- b) Drenagens conseqüentes radiais: formam padrão radial a partir do centro do domo e podem ser capturadas tanto por drenagens subseqüentes como podem fluírem diretamente para fora do domo;
- c) Drenagens subseqüentes secundárias: possuem padrão concêntrico e se desenvolvem ao longo de cuestas erodidas pelas drenagens conseqüentes na porção interior do domo;
- d) Drenagens obseqüentes: convergem para o centro do domo e, geralmente são coletadas por uma drenagem central seguida de inversão da topografia;

- e) Inclinações isoclinais: são longas, com suaves inclinações controladas pelo mergulho dos planos de acamamento, podendo também envolver outras superfícies de erosão;
- f) Escarpas: são curtas e com fortes inclinações que fazem o contato litológico entre diferentes camadas erodidas, com declividade em direção à crista erodida do domo.

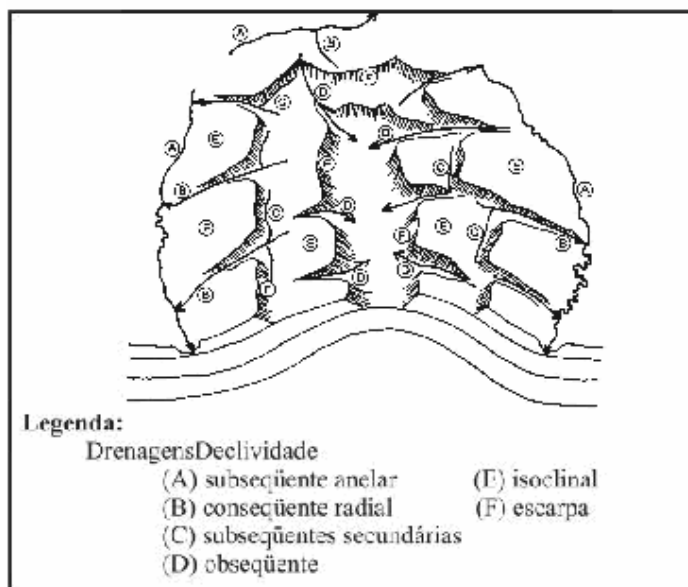


Figura 2: Elementos básicos de declividade e drenagem de um domo idealizado.
Fonte: Adaptado de Berger (1994).

Berger (1994) utilizou esses elementos básicos para determinar o estágio de evolução erosional de uma feição estrutural, reconhecendo três estágios distintos nessa evolução, como indicado na **Figura 3** e mencionados a seguir:

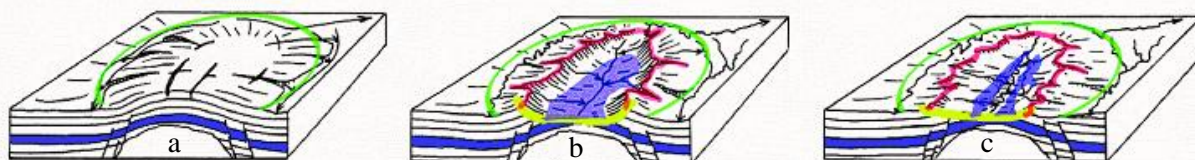


Figura 3: Modelos de evolução erosiva de uma feição estrutural dômica: a) estágio de relevo positivo; b) estágio de erosão inicial; c) estágio de erosão avançada.

FONTE: Adaptada de Berger (1994).

Estágio 1: Relevo Positivo

Neste estágio o domo exibe topografia central elevada decaindo suavemente até as drenagens subseqüentes. Essas drenagens se ajustam ao perímetro do domo, geralmente contínuas ou com pouca interrupção. As drenagens conseqüentes radiais são os elementos dominantes dentro do domo, provocando dissecação topográfica ao longo das inclinações isoclinais. No fim desse estágio, uma nova categoria de drenagem começa a aparecer, na forma de tributários conseqüentes radiais com confluência em ângulo reto, configurando um padrão concêntrico. Elas são denominadas drenagens subseqüentes secundárias, ainda pouco numerosas nesse estágio.

Estágio 2: Erosão Inicial

O incremento da atividade erosiva no centro do domo resulta em inversão da topografia inicial, desenvolvendo uma acentuada depressão central. Isto é feito principalmente por uma ou duas drenagens conseqüentes dominantes. Além disso, ocorre o aparecimento de escarpas,

como estruturas curtas e com forte declividade em direção ao centro da depressão, em oposição às isoclinais. Junto com essas estruturas surgem as drenagens obseqüentes. Elas seguem a mesma direção das escarpas, fluindo para o centro da depressão e, conforme vão se desenvolvendo, capturam gradualmente drenagens conseqüentes radiais.

Estágio 3: Erosão Avançada

O avanço da erosão provoca a expansão das drenagens obseqüentes, que acabam capturando a maior parte das drenagens conseqüentes. Na parte central, uma drenagem divide o domo em duas partes, ampliando essa área central. Este processo leva a um abaixamento substancial do relevo e arredondamento das formas, conduzindo a uma quase destruição de seu modelo original. No decorrer desse processo, pode se desenvolver uma ampla área de sedimentação produzida pelas drenagens obseqüentes de baixo gradiente.

O processo de reconstrução da geometria em superfície de uma estrutura geológica em subsuperfície consiste de quatro passos, ilustrados na **Figura 4**.

1. Identificação, a partir de mapas geológicos, de unidades litoestratigráficas que servirão para determinar a camada guia para reconstrução da expressão da estrutura geológica em superfície;
2. Medidas de direção e sentido do mergulho da camada guia devem ser obtidas em torno da estrutura. Na ausência de dados estruturais de campo, deve ser usado o sistema de três pontos para inferir sobre a direção e sentido do mergulho da camada guia;
3. Através de dados topográficos, linhas de contorno são desenhadas ao longo da camada exposta. A forma, o espaçamento e o valor de cota das linhas de contorno são guiados pelas medidas de direção e direção de mergulho da camada guia;
4. Durante o passo final, as camadas erodidas são reconstruídas, usando como guia medidas de direção e sentido de mergulho de camadas acima ou abaixo da camada guia.

Segundo Berger (1994), outros elementos estruturais como falhas também podem ser usados nesta reconstrução. O deslocamento vertical ao longo da linha de falhas dos blocos pode ser refinado pelas medidas da diferença de elevação. Aquele autor destaca ainda que a precisão da reconstrução e o nível de detalhamento da estrutura obtida dependem do grau de exposição da camada guia e da precisão dos procedimentos usados.

Como vimos, na reconstrução topográfica de anomalias morfoestruturais, dados de atitude de camadas são necessários como guias das linhas de contorno estrutural dessas anomalias. Esses dados podem ser estimados a partir de modelos de elevação do terreno obtidos pela SRTM. Esse procedimento pode ser executados com o programa PCIGeomatics 10.0 (PCIGeomatics, 2005), através da interpolação de Lagrangian pelo sistema de três pontos descritos por Haneberg (1990). Inicialmente, o método utiliza um ponto flutuante para determinar dois novos pontos com a mesma elevação do ponto flutuante. Com isso obtém-se a linha de direção (*strike*) da camada. Uma perpendicular a ela define o sentido do mergulho (*dip*) da camada. Esses procedimentos estão ilustrados na **Figura 5**. Para a obtenção de resultados confiáveis é necessário um conjunto de pontos para os quais se podem obter informações plani-altimétricas (x, y e z). Esses pontos devem ser buscados prioritariamente onde se constatou inclinações topográficas isoclinais no modelo SRTM, que podem estar relacionadas com o plano de acamamento sedimentares. Detalhes matemáticos do modelo de três pontos podem ser encontrados em Haneberg (1990) e Fienen (2005).

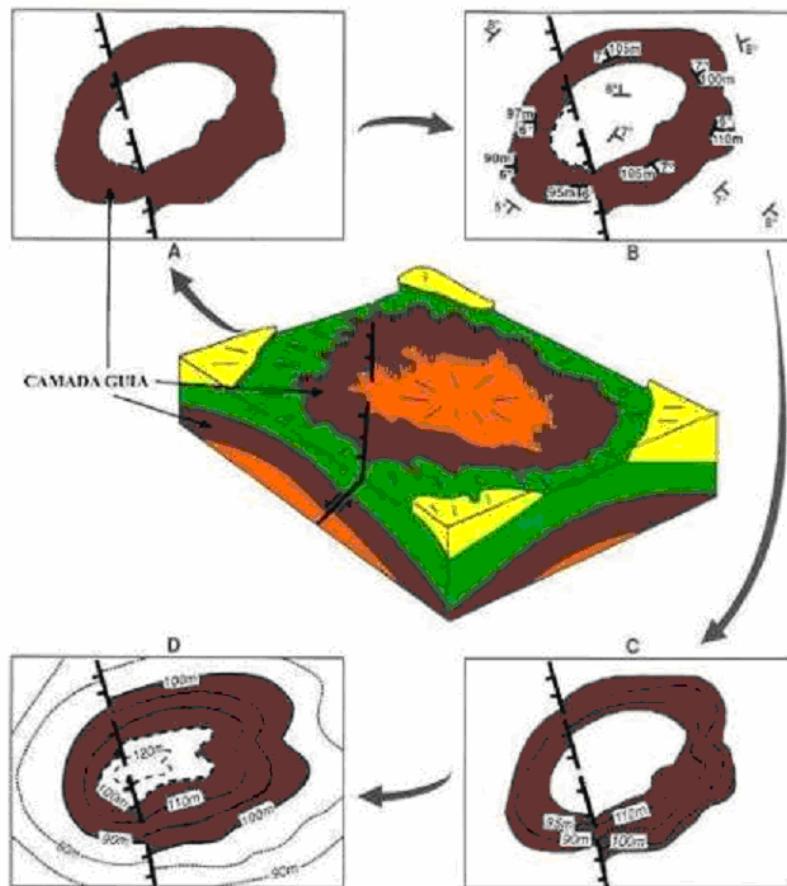


Figura 4: Bloco diagrama utilizado para ilustrar os quatro passos envolvidos na reconstrução topográfica em superfície de estruturas em subsuperfície. A) unidades litoestratigráficas são identificadas; B) medidas de atitude das camadas são obtidas; C) a geometria de uma camada guia exposta é construída; D) camadas erodidas são reconstruídas e interpoladas com trechos camadas remanescentes.

FONTE: Adaptada de Berger (1994).

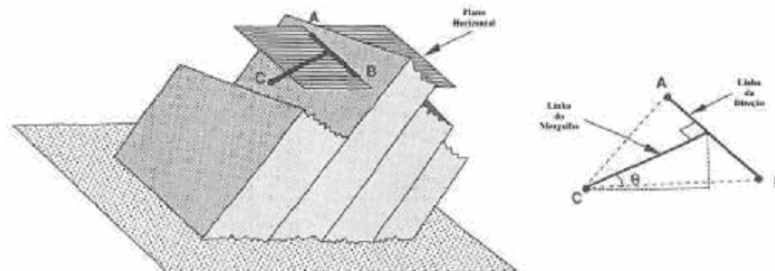


Figura 5: Sistema de três pontos. Pontos A e B possuem a mesma elevação e determinar a direção de camada. A linha perpendicular à direção indica o sentido do mergulho.

FONTE: Adaptada de Berger (1994).

Sabe-se que a precisão das medidas obtidas por esse método depende de dois fatores principais: da precisão do modelo de elevação digital do terreno e da precisão na determinação das camadas em superfície, função do nível de exposição da rocha. A ausência de exposição de camadas na área de estudo impossibilitou a determinação de uma camada guia, essencial no emprego do sistema de três pontos. Contudo, esse sistema foi utilizado

como alternativa à ausência de dados estruturais de superfície e para demonstrar o potencial da técnica de reconstrução topográfica de estruturas em subsuperfície nas condições amazônicas. Deve-se considerar ainda que em função do comprimento de onda da frequência de radar em banda C, a resposta interferométrica que gera o modelo de elevação digital da SRTM em regiões de densa cobertura vegetal com a Amazônia, resulta da interação do sinal de radar com os componentes do dossel (folhas e galhos). Assumindo que em áreas de coberturas vegetais homogêneas a copa das árvores acompanha o declive do terreno, os modelos baseados no método dos três pontos com dados SRTM constituem uma aproximação razoável para essas condições, dada a ausência de mapas topográficos na região.

3. Reconstrução topográfica de anomalias morfoestruturais

Para exemplificar a utilização da reconstrução topográfica foram selecionadas três anomalias morfoestruturais em diferentes estágios de erosão, identificadas previamente por Ibanez e Almeida-Filho (2006). Identificados seus padrões de drenagem e características de declividade, essas informações podem ser usadas como guia para a reconstrução topográfica dessas anomalias morfoestruturais.

A anomalia morfoestrutural, indicada na **Figura 6**, é classificada no estágio de relevo positivo (comparar com a **Figura 3**). Essa anomalia exhibe topografia central elevada com drenagem subsequente, subsequente secundária, consequente e ausência de drenagem obsequente. As inclinações isoclinais são longas, o que facilita a colocação de pontos plani-altimétricos, utilizados na reconstrução topográfica. Essas inclinações isoclinais foram selecionadas para colocação dos pontos plani-altimétricos pela dificuldade para determinação de uma camada guia, essencial nesse tipo de procedimento. Na reconstrução topográfica, os contornos originais da estrutura foram guiados pelas medidas de atitude de camada obtidas através do método de três pontos. Para esse procedimento foram colocados pontos plani-altimétricos tanto dentro da área identificada da estrutura, determinada pelas drenagem subsequente (**Figura 6a**), como também nos seus arredores. As medidas de atitude mostram sentidos opostos de mergulho dentro da estrutura (**Figura 6b**), o que pode ser explicado pela dificuldade na determinação de uma camada guia. Além disso, essas medidas de atitude estão refletindo o sentido de mergulho da superfície, o que não necessariamente é o mesmo sentido de camadas litoestratigráficas. Deste modo, em regiões com grande cobertura sedimentar e vegetal, como a Amazônia, a seleção de inclinações isoclinais torna-se essencial a fim de amenizar esse problema.

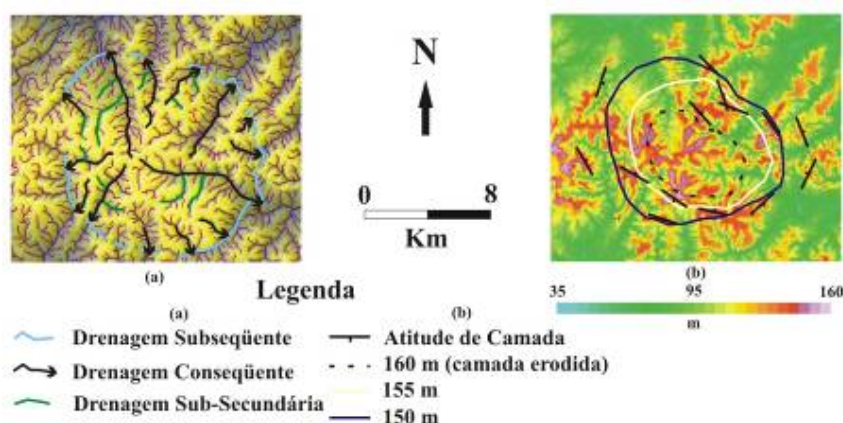


Figura 6: Reconstrução topográfica de anomalia morfoestrutural em estágio de relevo positivo: a) imagem SRTM com realce de elementos de drenagem; b) curvas topográficas inferidas definindo a reconstrução da anomalia.

Na **Figura 7a** (comparar com a **Figura 3b**), a anomalia morfoestrutural é classificada em estágio de erosão inicial. Nesta anomalia ocorre o aparecimento de uma drenagem central que a divide em duas partes. Essa drenagem, originada de uma antiga drenagem consequente, acaba por erodir o centro do domo, a qual provoca o aparecimento de drenagem obsequentes, que aos poucos vão capturando os canais consequentes, ainda presente neste estágio. Além desses elementos de drenagem, apenas alguns resquícios de inclinações isoclinais presentes próximas ao centro da área da estrutura revelam de se tratar de um domo. Geralmente, as inclinações isoclinais, a partir desse estágio de erosão, tornam-se mais raras, principalmente próximo ao centro da estrutura, sendo que elas estão associadas a pequenas áreas, como pode ser visto na **Figura 7b** nas cores rosas e vermelho, as quais representam as maiores altitudes para aquela área.

Como já mencionado, no último estágio de erosão relatado por Berger (1994), ocorre a total inversão da topografia, com ampliação da calha central, desaparecimento das drenagem consequentes e domínio das drenagem obsequentes no centro da anomalia (comparar **Figuras 3c e 8a**). As inclinações isoclinais são raras, restando apenas alguns resquícios da topografia original, identificadas a partir das cores rosa e vermelha no centro da estrutura na **Figura 8b**. Desta forma, apesar da total inversão topográfica, é possível classificar essa estrutura como domo utilizando os elementos de drenagem e declividade e as informações topográficas do SRTM.

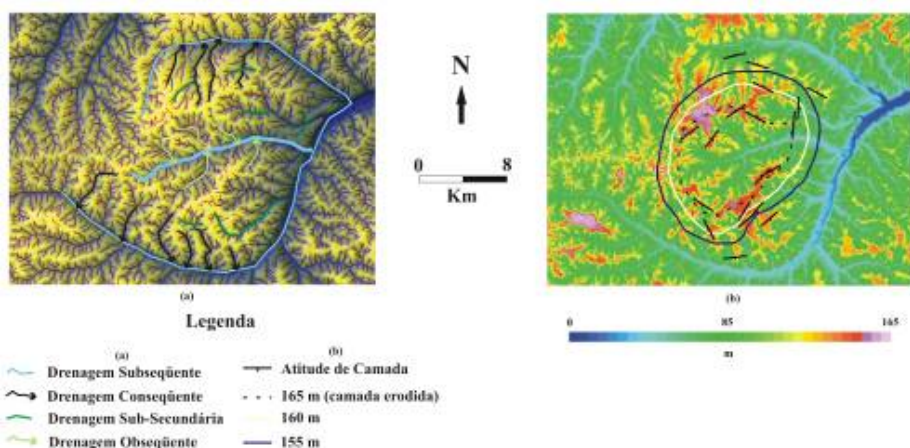


Figura 7: Reconstrução topográfica da anomalia morfoestrutural em estágio de erosão inicial: a) imagem SRTM com sobreposição de elementos de drenagem; b) curvas topográficas inferidas definindo a reconstrução da anomalia.

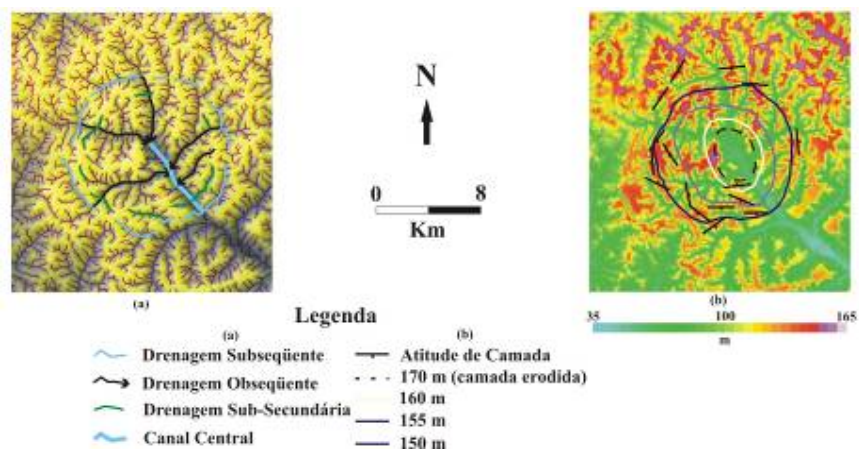


Figura 8: Reconstrução topográfica de anomalia morfoestrutural em estágio avançado de erosão: a) imagem SRTM com sobreposição de elementos de drenagem; b) curvas topográficas inferidas definindo a reconstrução da anomalia.

4. Conclusões

A utilização da técnica de reconstrução topográfica pelo método dos três pontos a partir de dados topográficos do SRTM permite a reconstrução de feições morfoestruturais em diferentes estágios de erosão. A classificação de estruturas como dômicas, que poderiam ser interpretadas como depressões estruturais, pode ser feita com a combinação de elementos de drenagem, declividade e dados SRTM. Tais feições podem constituir potenciais trapas estruturais favoráveis à acumulação de óleo e gás. O método pode ser de valia, contribuindo com o esforço exploratório nas bacias sedimentares paleozóicas da Amazônia.

5. Referências Bibliográficas

- Aghassy, J.; Berger, Z. Application of side-looking color infrared photography for structure detection in subtle topography. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15., 1981, Ann Arbor, MI. **Proceedings...** Ann Arbor, MI: ERIM, 1981. p. 491-498.
- Berger, Z. **Satellite Hydrocarbon Exploration: Interpretation and Integration Techniques**. Berlin: Springer-Verlag-Heidelberg, 1994. 319 p.
- Fienen, M. N. The Three-Point Problem, Vector Analysis and Extension to the N-Point Problem. **Journal of Geoscience Education**, v. 53, n. 3, p. 257-262, May 2005.
- Haneberg, W. C. A Lagrangian interpolation method for three-point problems. **Journal of Structural Geology**, v. 12, n. 7, p. 945-947, 1990.
- Ibanez, D. M.; Almeida Filho, R. Análise Morfoestrutural a Partir de Modelos de Elevação SRTM no Auxílio à Pesquisa de Hidrocarbonetos na Região do Rio Uatumã, Bacia Sedimentar do Amazonas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 43, 2006, Aracaju, Anais... Aracaju, SE: SBG, 2006. p. 1-6.
- Miranda, F. P. Sensoriamento remoto na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Amazonas. **Boletim Técnico Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. 268-291, Out./Dez. 1983.
- Miranda, F. P.; Boa Hora, P. P. Morphostructural analysis as an aid to hydrocarbon exploration in the Amazonas Basin, Brasil. **Journal of Petroleum Geology**, v. 9, n. 2, p. 163-178, Apr. 1986.
- Miranda, F. P.; Bentz, C. M.; Fonseca, L. E. N.; Lima, C. C.; Costa, A. R. A.; Nunes, K. C.; Felgueiras, C. A.; Almeida Filho, R. **Integração de dados de sensoriamento remoto, aeromagnetometria e topografia na definição do arcabouço estrutural da região do Rio Uatumã (Bacia do Amazonas)**. (Projeto 01.04.18) Rio de Janeiro, PETROBRAS CENPES/DIVEX/SETEC. 1994. 61 p.
- PCIGeomatics, **Geomatica Focus User Guide**. Geomática Version 10.0, Ontário, Canada: Richmond Hill, 2005.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. The Shuttle Radar Topography Mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, Feb. 2003.
- Soares, P. C.; Fiori, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, n. 32, p. 71-104, Dez. 1976.
- Soares, P.C.; Luz, M. E. R.; Redaelli, R.; Guerra, S. M. S. Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2., 1982, Brasília., **Anais...** Brasília, DF: CNPQ, 1982. v. 1, p.157-168.