

O SENSORIAMENTO REMOTO E A ESTRUTURA RÚPTIL:
EXEMPLOS DE APLICAÇÕES EM ESTUDOS TECTÔNICOS

Athos Ribeiro dos Santos
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Ministério da Ciência e Tecnologia
Caixa Postal 515, 12201 - São José dos Campos - SP

RESUMO

Uma das características potencialmente mais favoráveis dos produtos fotográficos de pequena escala é a capacidade de visualização regional de estruturas geológicas, principalmente as de caráter rúptil. A evolução dos estudos tectono-estruturais utilizando-se produtos de sensoriamento remoto levou a sistematização de procedimentos fotointerpretativos diversos com o objetivo de obter informações estruturais a nível regional. Alguns exemplos de aplicação destes procedimentos são mostrados neste trabalho, discutindo-se aspectos metodológicos, aplicações, potencialidades, limitações e resultados. O estudo dos eventos de tectônica rúptil e rúptil-dúctil, a nível regional, constitui-se numa importante ferramenta para um melhor entendimento do quadro evolutivo de uma dada área, permitindo interpretações sobre a distribuição, a dinâmica e a influência dos principais sistemas de fraturamento no arcabouço tectônico.

ABSTRACT

The regional distribution of the linear structural features is best characterized in small scale remote sensing products. The development of structural studies utilizing remote sensing data has provided a systematic procedures of photointerpretation with the purpose of the extraction of structural informations in a regional scale. Some of these procedures are showed in this paper and are discussed about their methodology, potentiality, limitations and results. The remote sensing techniques contribute good results in the regional tectonic studies. With these techniques, both brittle and brittle-ductile tectonics can be deduced.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de produtos de sensoriamento remoto de pequena escala em estudos tectono-estruturais tem alcançado um avanço significativo nos últimos anos. Isto deve-se à multiplicidade de sistemas de coleta de informações disponíveis, principalmente a nível orbital, e ao esforço dispendido por estudiosos de diversos países, no sentido de explorar uma das características marcantes de muitos destes produtos: a boa definição das estruturas rúpteis.

A potencialidade destes produtos para estudos estruturais foi inicialmente observada pela facilidade de acompanhamento dos grandes traços estruturais regionais. Adicionalmente, a grande quantidade de informações, devido ao caráter multiespectral dos dados, indicava a necessidade do estabelecimento de procedimentos fotointerpretativos sistemáticos para uma exploração mais efetiva de tais ferramentas.

A partir de então, diversas formas de análise das imagens fotográficas foram desenvolvidas com o intuito de fornecer informações tectônicas e estruturais. Este trabalho procura mostrar algumas destas abordagens, suas potencialidades e limitações e, principalmente, difundir um ramo de pesquisa em sensoriamento remoto, promissor e que, ainda hoje não encontra-se totalmente explorado.

2. O FRATURAMENTO E O SENSORIAMENTO REMOTO

Dentre os primeiros trabalhos que procuraram estudar a distribuição de padrões de fraturamento através da observação sistemática destas estruturas no campo, destacam-se os de HOBBS (1904,1912). O autor definiu o conceito de lineamento (com o objetivo de caracterizar as relações espaciais de feições de paisagens, tais como cristas, ou limites de áreas elevadas, alinhamentos de fraturas ou zonas de falhas), além de estabelecer a importância das fraturas na evolução das formas de relevo, e observar uma tendência destas estruturas rígidas de distribuírem-se em padrões regulares e com relações ortogonais. Muitos dos conceitos e das observações feitas por Hobbs no início do século continuam válidas e são aceitas atualmente.

Posteriormente, Sonder (1947) e Vening Meinesz (1947) sugeriram um padrão global de distribuição de fraturas de cisalhamento, formadas nas fases iniciais da evolução da terra, modelo adotado de forma semelhante por Moody e Hill (1956). Mais recentemente, outros autores (Kutina, 1974; Kvet, 1974; Pilger, 1974; Nickelsen, 1974; Plicka, 1974; Bryukhanov et alii, 1982; Kogan e Khitarov, 1982; Bush, 1983) observaram, também a distribuição sistemática de padrões de fraturamento regional e constataram a importância de redes de falhas de distribuição ampla, formadas por estruturas antigas, poliativas, pro

fundas e fundamentais no controle da evolução geológica.

Os fundamentos acima expostos constituem a base a partir da qual procura-se explorar os produtos de sensoriamento remoto de pequena escala através da identificação e do tratamento dos elementos estruturais. A validade da relação entre os elementos estruturais rúpteis, como ocorrem na natureza, e as feições observadas nas imagens fotográficas é embasada em conceitos desenvolvidos por alguns dos autores citados acima.

Plicka (1974) classifica as macrojuntas que ocorrem na natureza em dois tipos fundamentais: juntas de acamamento e zonas de juntas.

As juntas de acamamento referem-se a aquelas confinadas a um estrato, são aproximadamente perpendiculares ao plano de acamamento e por tanto, dependentes da atitude da camada rochosa onde instalaram-se.

As zonas de juntas consistem de grupos de estruturas com alto ângulo de mergulho, espaçadas regularmente, sub-paralelas, estendendo-se por amplas áreas e grandes distâncias e com profundidades consideráveis. As zonas de juntas de um dado sistema (azimute) ocorrem repetidamente, formando conjuntos de zonas de juntas, de gênese uniforme, e onde associam-se linhas de falhas. Estas zonas de juntas independem da atitude e do tipo de rocha. As zonas de juntas estendem-se ao longo de grandes falhas da crosta terrestre (lineamentos).

As zonas de juntas, ainda segundo o autor, podem ser usadas para determinar o padrão tectônico de uma dada região, baseando-se no fato de que sistemas de zonas de juntas delineiam as feições tectônicas principais, as quais constituem o arcabouço estrutural da área. Estes estudos permitem analisar as relações genéticas e geométricas entre as zonas de juntas, as quais são caracterizadas por tectônica de falha. As zonas de juntas são mais antigas do que as falhas associadas, pois o desenvolvimento destas últimas segue muitas vezes, mais de um sistema de zona de juntas, mudando abruptamente o seu curso. As zonas de juntas podem, segundo o autor, indicar tectônica profunda e, o conjunto destas zonas é diretamente indicada por feições geomórficas.

Outras observações e conclusões feitas por diversos autores são dadas a seguir:

- conjuntos de zonas de juntas propagam-se verticalmente para as rochas sobrejacentes mais jovens (Kutina, 1974; Nickelsen, 1974; Pilger, 1974);
- Alguns lineamentos maiores tem persistido desde o Pré-cambriano afetando a sedimentação, a tectônica, a expressão fisiográfica e a localização de depósitos econômicos (Nickelsen, 1974);
- padrões de fraturas são cumulativos (vários episódios de fraturamento) e persistentes (não facilmente destruíveis por eventos tectônicos posteriores) (Nickelsen, 1974);

- padrões de fraturas em todas as escalas, desde a microscópica até a nível de imagem de satélite, tem feições em comum (Nickelsen, 1974; Plicka, 1974).

A partir das características de juntas e fraturas citadas acima, alguns pontos podem ser analisados. Com relação a classificação de juntas de Plicka (1974), é evidente que em estudos tectono-estruturais o interesse reside nas estruturas do tipo zona de juntas, as quais são associadas a tectônica de falhamentos, regionais e, por consequência, podem fornecer subsídios sobre a evolução geológica e sobre o atual arcabouço tectônico da área. Neste sentido, as zonas de juntas são, realmente, as feições mais proeminentes e marcantes nos produtos fotográficos de pequena escala, devido a dois motivos principais: a sua distribuição sistemática e contínua por grandes extensões, tornando-as representativas mesmo em pequenas escalas; e devido ao alto ângulo de mergulho, comum a estas feições, possibilitando uma maior facilidade a infiltração de água e, conseqüentemente, um intemperismo mais profundo (Nickelsen, 1974), resultando em um realce morfológico mais acentuado. Por outro lado, as juntas de acamamento, devido ao seu caráter localizado distribuição irregular e assistemática, são pouco representativas em termos de imagens fotográficas de pequena escala.

3. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

Existem diversos tipos de abordagens na utilização de produtos de sensoriamento remoto de pequena escala em estudos tectono-estruturais. Genericamente, estes estudos fundamentam-se na análise das formas de relevo e da rede de drenagem (vide Soares e Fiori, 1976; Veneziani e Anjos, 1982). A identificação dos lineamentos e alinhamentos de relevo e de drenagem permite, o estabelecimento do quadro geral de fraturamento de uma determinada área, e a utilização de outras propriedades texturais fornece informações adicionais importantes (p. ex. o estudo minucioso da assimetria da rede de drenagem permite obter indícios, através das variações de mergulho, sobre a dinâmica de movimentação de blocos embasamentais, em sub-superfície, em regiões de bacias sedimentares).

Sem pretender explorar todas as possíveis aplicações, o trabalho descreve a seguir algumas abordagens genéricas de produtos de sensoriamento remoto de pequena escala em estudos tectono-estruturais.

Especificamente, com relação ao mapa de fotolineamentos (entendendo-se como mapa de fotolineamentos aquele que contém em maior nível de detalhe possível, as lineações e alinhamentos de drenagem e de relevo extraídas das imagens fotográficas, ou seja, o quadro geral do fraturamento de uma região) as abordagens podem ser agrupadas em duas classes gerais: análises qualitativas e quantitativas.

As análises qualitativas baseiam-se nas observações sobre a distribuição, intensidade e relações de intersecção dos fotolineamentos. Estas análises permitem obter indicações de diver-

so tipos sobre um dado evento tectônico, e sobre a relação existente entre os diversos eventos, os quais resultaram nos atuais sistemas de fraturas existentes em uma determinada área.

A análise individual de cada um dos sistemas de fraturas (os sistemas de fraturas são definidos por azimute a partir do mapa de fotolineamentos, pela concentração dos elementos estruturais fotointerpretados em feixes regularmente orientados e distribuídos pela área, com o controle cuidadoso feito através dos dados geológicos existentes) permite observar a sua variação de intensidade dentro de toda a área e obter, assim informações sobre o comportamento de um determinado evento tectônico rúptil ou rúptil-dúctil. Em outras palavras, um aumento progressivo do número de fotolineamentos em um determinado sentido evidencia um incremento, nesta mesma direção, de atuação do evento tectônico que deu origem a este sistema de fraturas, ou ainda, a sua interrupção brusca pode indicar um controle tectônico, separando duas províncias ou blocos estruturais distintos (Fig. 1). Observando-se as unidades geológicas que foram ou não afetadas por um determinado sistema de fraturamentos, pode-se adicionalmente, obter indícios sobre a época da atuação do evento tectônico. A análise individual de um sistema de fraturas pode permitir, também, a identificação de falhamentos, pela concentração de fotolineamentos (Plicka, 1974), o que muitas vezes, de outra forma não é possível por não constituírem feições de imagens contínuas e conspícuas (Fig. 2).

A utilização cuidadosa e criteriosa do mapa de fotolineamentos (análise conjunta dos sistemas de fraturas), e da maior quantidade de dados geológicos, permite obter algumas indicações sobre os esforços que atuaram na região. Estes indícios devem ser encarados como informações preliminares, que necessitam de confirmação através de outros meios, para que não gerem interpretações errôneas. A individualização dos feixes onde concentram-se as fraturas (ou fotolineamentos) (maiores detalhes sobre a metodologia de utilização de feixes de fraturas estão em Mattos et alii, 1982) de cada uma das direções permite uma melhor visualização dos principais sistemas de fraturamento, assim como a análise das relações de interferência entre eles. Esta análise, juntamente com os dados geológicos, permite identificar as direções que tiveram ao longo do tempo, um caráter compressivo, distensivo, poliativo, etc, e através destas informações analisar a distribuição de esforços em toda a área de estudo (resultados práticos destes procedimentos são mostrados neste simpósio nos trabalhos de C.E. Anjos e P. Veneziani; C. E. Anjos e E. Crepani; O.S. Sampaio, J.T. de Mattos e P. Veneziani).

As análises quantitativas referem-se, essencialmente, as formas de tratamento estatístico de fotolineamentos. Existem diversas formas de tratar-se estatisticamente este elemento, utilizadas, geralmente, para obter informações sub-superficiais sobre estruturas do tipo sinclinal/anticlinal, importantes para a pesquisa petrolífera (Permiakov, 1949 in Huntington, 1969; Blanchet, 1957; Haman, 1961; 1964;

Huntington, 1969). Estas aplicações são, normalmente, locais e muitas utilizam-se de diagramas de rosácea a partir de fotolineamentos e controle de campo, para obter informações sobre a distribuição dos sistemas de fraturas na área, e sobre a estrutura em sub-superfície, em termos de tipo, comprimento, largura, etc.

Com o advento dos produtos fotográficos obtidos por satélites de grande altitude, os estudiosos procuraram adaptar estes métodos existentes e propuseram novas formas de abordar o tratamento estatístico de fotolineamentos com o intuito de obter informações estruturais a nível regional. Muitos destes métodos utilizam-se dos fundamentos desenvolvidos em aplicações locais e exploram o uso de diagramas de rosácea (por ex. Kowalik e Gold, 1974). Outros autores utilizam-se, também, de classificações de fotolineamentos por orientação, tamanho, etc. na sua análise estatística (por ex. Aliyev, 1980).

A título de exemplo e por experiência do autor, é mostrado o tratamento desenvolvido a partir de Aliyev (1980), cuja aplicação tem dado resultados importantes com relação a informações tectônicas e evolutivas nas áreas onde aplicado (vide Santos e Schorscher, 1984).

O trabalho estatístico baseia-se na premissa de que uma fratura é uma zona de fraqueza e, portanto, uma zona potencial no condicionamento da distribuição dos eventos rupturais posteriores que afetaram uma dada região.

Os sistemas de fotolineamentos (definidos no mapa de fotolineamentos por intervalo de azimute) são tratados estatisticamente, através da contagem ponderada das fraturas fotointerpretadas e, através do processo de interpolação obtêm-se mapas de frequência de fraturas. A análise individual e conjunta destes mapas, permite obter informações tectônicas sobre uma determinada área, como descritas, de forma geral, a seguir:

- É possível analisar a distribuição espacial, de forma quantificada, de cada um dos principais eventos tectônicos rúpteis e rúpteis-dúcteis que atuaram em uma região (Fig. 4A,B);

- Através da análise da distribuição dos máximos de concentração de fraturas de um dado sistema é possível verificar o controle exercido quando da instalação deste evento por descontinuidades pré-existentes (os máximos de concentração de fraturas posicionam-se sobre estas descontinuidades, que podem ter orientação diversa da do sistema de fraturas) (Fig. 4A,B);

É possível identificar descontinuidades, que de outra forma não são aparentes, pelo posicionamento de máximos de frequência de fraturas de um ou mais sistemas de fraturamento (Fig. 4).

- A identificação de padrões anômalos de fratura (entendendo-se como padrão anômalo de fraturas o condicionamento diferente de um dado sistema em uma área específica

ca, com relação a área toda em análise) restritos a unidades ou ambientes geológicos, permite interpretações tectônicas e evolutivas (vide Santos e Schorscher 1984).

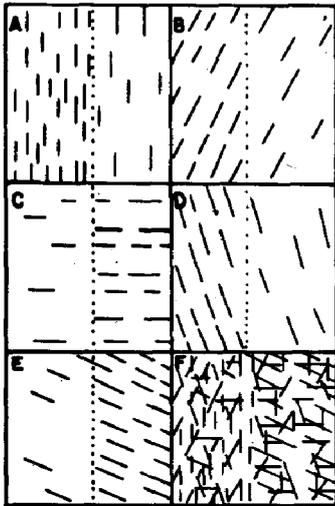


Fig. 1 - Exemplo teórico e simplificado onde a análise individual de cada um dos sistemas de fotolineamentos (A, B, C, D, e E) indicam um comportamento estrutural distinto em ambas as metades da área, separadas pela linha pontilhada. Esta diferença não é clara no mapa geral de fotolineamentos (F).

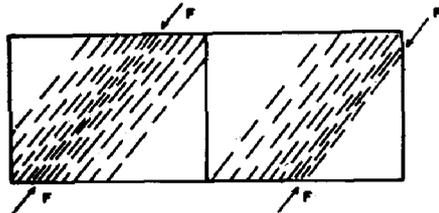


Fig. 2 - Exemplos teóricos e simplificados de feixes onde a concentração de fotolineamentos define uma descontinuidade maior.

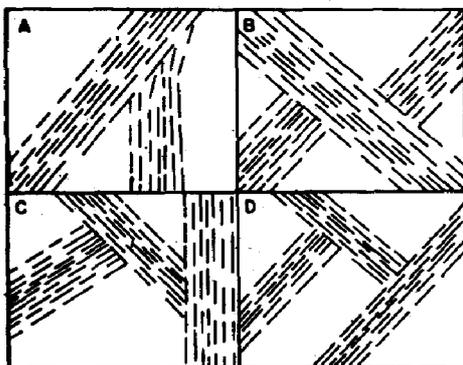


Fig. 3 - Exemplos teóricos e simplificados de análise de feixes de fraturas indicando alguns tipos de informações sobre a dinâmica de falhamentos: (A) esquema indicando o arrasto das fraturas N-S pela movimentação das fraturas NE-SW;

(B) esquema indicando a interrupção e deslocamento das fraturas NE-SW pelas fraturas NW-SE; (C) esquema indicando a atuação sequencial de sistemas de fraturas: o sistema NE-SW é interrompido por um evento posterior NW-SE e este por um mais jovem N-S. (D) esquema mostrando dois sistemas de fraturas NE-SW e NW-SE que se interrompem mutuamente, indicando um par de fraturas conjugadas.

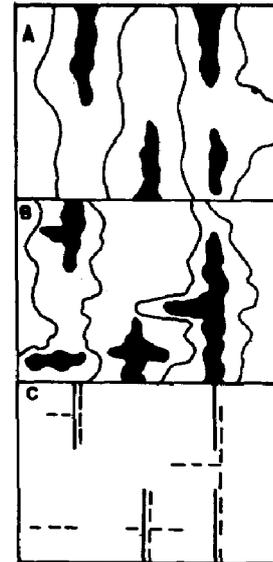


Fig. 4 - Exemplo teórico e simplificado de uma análise estatística de fotolineamentos: (A) Mapa de frequência de fraturas de um evento rúptil N-S mostrando a disposição de seus máximos de frequência (áreas em negro) na mesma direção do evento (N-S); (B) Mapa de frequência de fraturas de um dado evento rúptil E-W mostrando a disposição de seus máximos de frequência nas direções E-W e N-S, indicando a influência de fraturas com esta última orientação na distribuição das estruturas E-W; (C) Mapa de eixos de máximo de frequência de fraturas indicando as principais linhas de fraqueza que influenciaram a distribuição das estruturas dos dois eventos tectônicos (/ N-S, / E-W).

- A utilização conjunta de todos os mapas de frequência de fraturas relativos aos diversos eventos tectônicos que afetaram uma determinada área permite a datação relativa destes eventos através da análise da distribuição dos máximos de concentração de fraturas (Por exemplo, na figura 4, um dado sistema de fraturas N-S (Figura 4A) tem a disposição de seus máximos orientados apenas na direção N-S. Já, um outro sistema E-W (Figura 4B) tem a disposição de seus máximos nas direções E-W e N-S. Isto indica que a distribuição das fraturas E-W é parcialmente controlada por fraturas mais antigas de direção N-S).

- Através da análise conjunta dos diversos mapas de fraturas é possível definir as principais descontinuidades antigas que, durante a evolução geológica da área em estudo, tiveram um papel ativo, controlando e condicionando o arcabouço tectono-estrutural da região. Isto é possível através da observação dos máximos de frequência, de fraturas dos diversos sistemas que apresentem um posicionamento coincidente (Fig. 4C).

4. CONCLUSÃO

As abordagens exemplificadas no trabalho apenas mostram o amplo campo de aplicações de produtos fotográficos de pequena escala em estudos tectono-estruturais. Os resultados já alcançados indicam um promissor e amplo leque de aplicações em estudos geológicos, atuando estes procedimentos como ferramentas auxiliares que, quando utilizadas com critério e com o devido controle feito através dos dados geológicos, permitem uma contribuição efetiva em estudos tectono-estruturais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIYEV, A. Regional fracturing of the Pamirs and its metallogenic significance. *Doklady Akad. Nauk. SSSR*, 250:90-93, Moscow, 1980.
- BLANCHET, P.H. Development of fracture analysis as exploration method. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 41(8): 1748-1759.
- BRYUKHANOV, V.N.; BUSH, V.A.; YELOVICH, YE.L.; IKONNIKOV, YU.N.; KOZITSKAYA, M.T.; KOTELKOV, R.P.; LEBEDEV, S.P.; POSOSHKOVA, N.S. Linear and ring structures (as interpreted from satellite photographs). *Geotectonics*, 16 (1):1-7, 1982.
- BUSH, V.A. Transcontinental lineaments and problems of mobilism. *Geotectonics*, 17(4): 271-279, 1983.
- HAMAN, P.J. Lineament analysis on aerial photographs exemplified, in the North Sturgeon Lake Area, Alberta. *Calgary West Canadian Research Publ.*, serie 2, nº 1, 23 pp. 1961.
- Geomechanics applied to fracture analysis on aerial photographs. *West Canadian Research Publ.*, serie 2, nº 3, 31 pp. 1964.
- HOBBS, W.H. Lineaments of the Atlantic Border Region. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 15:482-506, 1904.
- Earth features and their meaning. 506pp. MacMillan Co., 1912.
- HUNTINGTON, J.F. Methods and Applications of fracture trace analysis in the quantification of structural geology. *Geol. Mag.*, 106(5):430-451, 1969.
- KOGAN, A.B.; KHITAROV, YU.N. Fundamental Patterns of Fault Tectonics of Cratonic Areas of the USSR. *Geotectonics*, 16(6): 486-492, 1982.
- KOWALIK, W.S.; GOLD, D.P. The use of LANDSAT-1 imagery in mapping lineaments in Pennsylvania. p. 236-249. *Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt Lake City, Utah, 1974.
- KUTINA, J. Relationship between the distribution of big endogenic ore deposits and basement fracture pattern-examples from four continents. p. 565-593. *Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974.
- KVET, R. Planetary equidistant rupture systems - A new concept based on the study of joint zones. p. 594-603. *Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974.
- MATTOS, J.T. de; BALIEIRO, M.G.; SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; MENESES, P.R.; CSORDAS, S. M. Análise Morfoestrutural com uso de imagens MSS-LANDSAT e RADAR para a pesquisa de hidrocarbonetos no Estado de São Paulo. 3 v., 211 pp., 40 mapas. INPE-2445-RTR/015. São José dos Campos, jun. 1982.
- MOODY, J.D. HILL, M.J. Wrench Fault Tectonics. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 67:1207-1248, 1956.
- NICKELSEN, R.P. Early Jointing and Cumulative fracture patterns. p. 193-199. *Proceeding of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974.
- PILGER, A. The importance of lineaments in the tectonic evolution of the earth's crust and in the occurrence of ore deposits in Europe. p. 555-564. *Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt City, Utah, June, 3-7. 1974.
- PLICKA, M. Observations on joint zones in Moravia, Czechoslovakia. p. 279-289. *Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974.
- SANTOS, A.R. dos; SCHORSCHER, H.D. O padrão de fraturamento e o condicionamento tectônico na região do Quadrilátero Ferrífero e parte do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais (Brasil). IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 3. Rio de Janeiro, 1984 (a ser publicado).
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática em análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Not. Geomorfológicas*, 16(32):71-104, dezembro de 1976.
- SONDER, R.A. Discussion of shear patterns of the earth's crust. *Am. Geophys. Union Trans.*, 28:939-945, 1947.

VENEZIANI, P.; ANJOS, C.E. dos; Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. 61pp., INPE-2227-MD/014. São José dos Campos, nov. 1982.

VENING MEINESZ, F.A. Shear patterns of the earth's crust. Am. Geophys. Union Trans., 28:1-61, 1947.