

1. Publicação nº <i>INPE-3465-PRE/708</i>	2. Versão	3. Data <i>Março, 1985</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DSR</i>	Programa <i>RECSAT</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>GEOLOGIA</i> <i>SENSORIAMENTO REMOTO</i> <i>VULCANISMO</i> <i>LINEAMENTOS</i> <i>ANDES</i>			
7. C.D.U.: <i>528.711.7:551.21(83/84)</i>			
8. Título <i>ESTUDO DO VULCANISMO NA REGIÃO DO SALAR DE COIPASA, ENTRE O CHILE E A BOLÍVIA, ATRAVÉS DE IMAGENS DO LANDSAT-3</i>		10. Páginas: <i>10</i>	
		11. Última página: <i>09</i>	
		12. Revisada por	
9. Autoria <i>José Eduardo Rodrigues</i>		 <i>Chan Chiang Liu</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor Geral	
14. Resumo/Notas <p><i>As imagens LANDSATs da região do Salar de Coipasa, nos Andes Centrais, revelam duas feições geológicas marcantes. A primeira é representada por um grande número de vulcões e pelas rochas a eles associadas. Estas rochas concentram-se principalmente na parte sudoeste da área estudada e formam um dos mais notáveis domínios morfológicos da região, a Cordilheira Ocidental. Outro proeminente elemento geológico é constituído por uma densa rede de lineamentos, os quais representam principalmente descontinuidades topográficas. Grande parte destes lineamentos segue as direções N60E e N25W, formando dois sistemas densos e amplamente distribuídos que condicionam o posicionamento dos edifícios vulcânicos presentes na área.</i></p>			
15. Observações <i>Apresentado na IV Reunião da SELPER, Santiago, Chile, Novembro 1984.</i>			

ESTUDO DO VULCANISMO NA REGIÃO DO SALAR DE COIPASA, ENTRE O
CHILE E A BOLÍVIA, ATRAVÉS DE IMAGENS DO LANDSAT-3

José Eduardo Rodrigues (1)

R E S U M O

As imagens LANDSATs da região do Salar de Coipasa, no Andes Centrais, revelam duas feições geológicas marcantes. A primeira é representada por um grande número de vulcões e pelas rochas a eles associadas. Estas rochas concentram-se principalmente na parte sudoeste da área estudada e formam um dos mais notáveis domínios morfológicos da região, a Cordilheira Ocidental. Outro proeminente elemento geológico é constituído por uma densa rede de lineamentos, os quais representam principalmente descontinuidades topográficas. Grande parte destes lineamentos segue as direções N60E e N25W, formando dois sistemas densos e amplamente distribuídos que condicionam o posicionamento dos edifícios vulcânicos presentes na área.

1. INTRODUÇÃO

Quando se trabalha com imagens de sensoriamento, em especial nos estudos de lineamentos, alguns aspectos devem ser considerados. Em primeiro lugar é necessário que as feições que se pretende analisar sejam compatíveis com a escala e com a resolução espacial utilizadas, pois não é prudente esperar que em imagens com resolução de algumas dezenas de metros possam ser claramente expressas feições de pequeno porte, tais como foliação (exceto em casos excepcionais), lineações, eixos de pequenas dobras, etc. Outra consideração a ser feita é a de que, embora as imagens orbitais sejam uma importante ferramenta para a observação de feições geológicas, tanto em nível regional quanto num enfoque mais localizado, não se pode pretender que a análise destas imagens possa por si somente permitir que se chegue a resultados absolutos. Para que se obtenham resultados conclusivos é necessário que a fotointerpretação seja complementada por dados petrogenéticos, geocronológicos, estruturais de campo, etc.

Por outro lado, também não é lícito supor que apenas dados adquiridos em campo possam dispensar a utilização de imagens ou fotos de pequena escala num trabalho de análise regional.

(1) Pesquisador Assistente, Divisão de Desenvolvimento de Metodologia, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

Dessa forma, na ausência de informações mais abrangentes e mais detalhadas sobre os aspectos geológicos da área enfocada, espera-se que os resultados aqui apresentados sejam encarados sob um ponto de vista exclusivamente metodológico e interpretativo.

1.1 OBJETIVO

Mesmo num rápido contato, as imagens LANDSATs revelam ao observador uma notável abundância de feições fortemente marcadas na topografia, as quais podem ser relacionadas com a história da evolução geológica local. Na área escolhida para o desenvolvimento deste trabalho, duas destas feições são bastante conspícuas e abundantes: uma diz respeito aos numerosos edifícios vulcânicos existentes, e a outra é representada por um grande número de lineamentos relacionados a descontinuidades topográficas ou, mais raramente, tonais.

Assim, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de verificar o grau de subsídios que as imagens LANDSATs podem fornecer ao estudo dos aspectos geológicos e estruturais da área e, principalmente, tentar estabelecer uma possível correlação entre a ocorrência de sistemas específicos de lineamentos e o posicionamento dos vulcões.

1.2 LOCALIZAÇÃO E FIOGRAFIA DA ÁREA

A área escolhida para a execução deste trabalho situa-se entre o Chile e a Bolívia (Figura 1) e equivale à imagem do ponto 73 da órbita 251 do LANDSAT. No extremo sudeste desta área, localiza-se o Salar de Coipasa, uma zona de captação fluvial, sem escoamento, remanescente do antigo Lago Minchin e para o qual converge a maior parte da drenagem local, cujo principal representante é o rio Lauca (Ahlfeld, 1972).

A geomorfologia está representada por dois grandes domínios morfoestruturais. A unidade mais ocidental é constituída por uma faixa de rochas neovulcânicas, de relevo acidentado, que recebe o nome de Cordilheira Ocidental ou Andes Ocidental. A outra unidade, que é formada por rochas detríticas, ocupa toda a parte centro-ocidental da área, é conhecida como *Altiplano*, tem relevo acentuadamente mais plano que o da unidade anterior e suas altitudes situam-se por volta dos 3600m.

A vegetação é extremamente pobre e apenas sobre as rochas vulcânicas e ao longo de alguns rios instalam-se populações de um pouco mais densas, conforme mostrado pelos níveis de cinza mais escuros observados no canal 5 do MSS-LANDSAT. Durante o inverno, as condições climáticas completamente hostis reduzem ainda mais a cobertura vegetal, fato que se reflete nas imagens do canal 5 do LANDSAT em níveis de cinza muito claros.

Devido às condições fisiográficas adversas, pouca atividade antrópica é desenvolvida na área, não sendo observados senão pequenos e raros povoados e precárias vias de acesso.

2. SINOPSE GEOLÓGICA

Segundo o Tectonic Map of South America (1978), a área vizinha ao Salar de Coipasa é parte de uma região de dobramentos cenozóicos dos Andes Centrais, na qual se distingue uma zona linear intracrônica, de idade Mioceno Médio a Plioceno Inferior, e bacias tarditectônicas quaternárias (parcialmente pliocênicas).

Essa zona intracratônica terciária aflora a nordeste do Salar de Coipasa, em forma de cristas alongadas segundo um "trend" NW a NNW, parcialmente concordante com a estrutura geral dos dobramentos paleozóicos que formam a Cordilheira Oriental (ausente na área estudada). Suas rochas são principalmente arenitos, conglomerados e argilitos, com intercalações de tufos e lavas. Outra exposição de rochas terciárias situa-se a 30km a noroeste do Salar de Coipasa e é constituída por lavas andesíticas e dacíticas e por tufos e brechas. Por último deve ser citada uma ocorrência localizada no extremo norte da área, formada, segundo o Mapa Geológico da Bolívia (YPFB/GEOBOL, 1978) por ignimbritos riódacíticos.

As rochas pertencentes às bacias andinas tarditectônicas ocupam a maior parte do polígono estudado. Sua idade, segundo o Tectonic Map of South America (1978) é quaternária e parcialmente pliocênica. Em sua maior extensão ocorrem depósitos aluviais, fluviolacustres, fluvio-glaciais, coluviais, morainas e dunas, representados principalmente por grauvas, arenitos, calcário, argilas e tillitos. No extremo sudoeste da área, em especial a partir da fronteira entre o Chile e a Bolívia, ocorrem lavas andesítico-dacíticas de idade pliocênico-quaternária que configuram um grande número de edifícios vulcânicos, isolados ou agrupados, cujas rochas acumuladas constituem a chamada "Cordilheira Ocidental" (Valenzuela et alii, 1980).

Com relação às estruturas geológicas desta parte do Chile e da Bolívia, poucas informações foram cartografadas até 1978 em profundo contraste com o detalhamento com que foram tratadas outras áreas. O Mapa Geológico da Bolívia (YPFB/GEOBOL, 1978), por exemplo, localiza alguns eixos de dobramentos sobre as rochas terciárias, mas, ao contrário do que se observa nas imagens LANDSAT, traz escassas informações sobre as estruturas rúpteis existentes. Mais recentemente, trabalhos como os de Brockmann (1980), Valenzuela et alii (1980) e Ponce e Avila (1980) reconhecem a importância dos lineamentos observados nas imagens LANDSAT no condicionamento tanto do vulcanismo quanto das mineralizações conhecidas.

3. ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS LANDSAT

É importante ter em mente que existem vários aspectos que afetam o nível da informação contida numa imagem LANDSAT. Os mais importantes destes aspectos relacionam-se direta ou indiretamente com as condições de sazonalidade que a Terra sofre durante o ano, como, por exemplo, o grau da umidade dos terrenos, o nível de crescimento da cobertura vegetal, e, muito especialmente, as condições de iluminação solar.

No caso dos lineamentos fotogeológicos, em geral representados por feições topográficas lineares ou alinhadas, sabe-se que eles tendem a ser melhor realçados, por efeito de sombreamento, quando iluminados por pequenos ângulos de elevação solar. Entretanto, deve-se considerar que, em regiões de relevo muito acentuado, um ângulo de iluminação exageradamente baixo pode provocar a formação de extensas sombras, as quais tendem a mascarar os detalhes da topografia e a dificultar uma boa definição dos lineamentos menores (Liu, 1984).

Em áreas onde ocorre uma cobertura vegetal pelo menos moderada, as feições topográficas, que incluem os lineamentos, em geral são mais bem observáveis nas imagens da banda 7 do LANDSAT do que na 5. Isto se deve ao fato de a vegetação ser revelada por níveis de cinza bastante escuros no canal 5, podendo mascarar o sombreamento e minimizar o realce da topografia. Ao contrário, em áreas de cobertura vegetal muito pobre, a vegetação poderá ocasionalmente apresentar um maior vigor ao longo de eventuais linhas de fraqueza estrutural, permitindo que os lineamentos aí instalados sejam mais facilmente identificados a partir das imagens do canal 5. Esta última consideração pode ser estendida aos lineamentos tonais, em geral mais bem expressos nas imagens do canal 5.

Quando se observam as imagens LANDSAT da região do Salar de Coipasa, obtidas em 21 de fevereiro de 1979, verifica-se que há uma grande similaridade entre os canais 5 e 7, o que denuncia a pouca influência da vegetação no comportamento espectral desses terrenos. Apenas ao longo de alguns rios o canal 5 revela a presença de uma vegetação um pouco mais exuberante, fato este que em alguns casos favorece a identificação de lineamentos representados por trechos retilíneos de rios. Com relação às condições de iluminação destas imagens, verifica-se que a elevação solar é de 47° , ou seja, relativamente alta se comparada com as elevações solares de outras datas. Assim, embora ocorra um satisfatório grau de contraste tonal que permite uma razoável identificação dos lineamentos tonais e das variações litológicas, os lineamentos topográficos não se expressam com a clareza desejada.

As imagens LANDSATs de 18 de junho de 1979 mostram que, com frequência, seus níveis de cinza são mais claros que os das imagens de fevereiro, em especial nas áreas de sedimentos quaternários e de forma marcante na imagem do canal 5. As causas estão relacionadas, provavelmente, à diminuição da cobertura vegetal e do grau de umidade dos terrenos durante os meses de inverno. O ângulo de elevação solar na imagem de junho é consideravelmente menor que na imagem de fevereiro, o que por um lado diminui os contrastes tonais, mas por outro realça fortemente as feições topográficas, entre os quais se inclui a maioria dos lineamentos fotogeológicos.

Se forem levadas em consideração as diversas características espectrais e de iluminação das imagens de cada uma das épocas consideradas, conclui-se que uma interpretação completa e coerente deve ser o somatório das interpretações de imagens de diversas épocas do ano, as quais apresentem condições sazonais próprias e distintas entre si.

4. O VULCANISMO E OS LINEAMENTOS FOTOGEOLOGICOS

Conforme foi citado anteriormente, a observação das imagens LANDSAT na região do Salar de Coipasa revela a nítida presença de dois elementos geológicos bem marcantes. O primeiro diz respeito aos inúmeros edifícios vulcânicos existentes e às rochas e feições a eles associadas. O outro é representado por um complexo conjunto de lineamentos fotogeológicos que se relacionam com a história geológica da região e parecem condicionar o posicionamento dos vulcões.

Os edifícios vulcânicos têm idade quaternária de acordo com o Mapa Geológico da Bolívia (YPFB/GEOBOL, 1978). Suas rochas podem ser cartografadas com relativa facilidade, tanto por ser destaque topográfico quanto pelo fato de normalmente exibirem, no canal 7, níveis de cinza mais escuros que as rochas sedimentares adjacentes. Este fato é particularmente visível na imagem de junho de 1979. Alguns destes vulcões localizam-se de forma isolada dentro dos domínios dos sedimentos quaternários, o que permite a delimitação bastante nítida das rochas a eles associadas.

Na maioria das vezes, entretanto, o que ocorre é uma interação entre rochas originadas por vários vulcões próximos entre si, formando extensos depósitos de rochas vulcânicas como, por exemplo, ocorre com a zona denominada *Cordillera Occidental*. Com relação à morfologia destes edifícios vulcânicos, as imagens LANDSAT são muito ilustrativas e nelas podem ser identificadas prontamente feições, tais como cones totalmente preservados, abatimentos centrais e até mesmo caldeiras aparentemente não-relacionadas com a presença atual de um vulcão.

Em relação aos lineamentos fotogeológicos, que constituem o principal enfoque deste trabalho, uma grande quantidade deles pode ser extraída das imagens. Quando se observa o mapa com o complexo conjunto destes lineamentos (Figura 2), percebe-se a necessidade de eles serem classificados em sistemas homogêneos para que se possa entender mais claramente suas implicações com a história geológica.

Tomando o "trend" como critério de classificação, identificam-se dois sistemas de lineamentos, mais ou menos homogeneamente distribuídos por toda a área, cujas direções situam-se próximas de N60E e N25W (Figura 3). Pela similaridade com que estes lineamentos se expressam nos terrenos, por seus comprimentos médios semelhantes e por sua igual distribuição, eles parecem ter sido gerados pelo mesmo evento tectônico, cuja cronologia, falta ser definida. Sua distribuição independe da unidade estratigráfica presente, ocorrendo tanto em terrenos quaternários quanto terciários, quer em rochas sedimentares quer em rochas de origem vulcânica. São lineamentos em geral sutis, cujo comprimento médio situa-se entre 5 e 6km. Nas áreas de domínio dos sedimentos clásticos estas feições lineares são, com frequência, representadas por descontinuidades tonais, enquanto sobre as rochas vulcânicas elas formam sempre quebras no relevo.

Se forem excluídos do mapa esses dois sistemas, percebe-se que os demais lineamentos têm uma sutil tendência a concentrar-se nas áreas de ocorrência dos depósitos de lavas situados a oeste da área de estudo (Figura 4). São lineamentos bem marcados na topografia, mais longos que os dos sistemas N60E e N25W, que poucas vezes obedecem a um direcionamento preferencial. Apenas ocasionalmente concentram-se em faixas pouco proeminentes com direções e extensões variáveis. A definição da origem destes lineamentos requer trabalhos de maior detalhe em campo, mas seu aspecto e sua distribuição sugerem preliminarmente que se tratam de feições relacionadas aos episódios mais tardios da história do tectonismo na área.

Quando se tenta verificar o possível relacionamento entre a posição dos vulcões e a distribuição dos lineamentos, alguns fatos tornam-se evidentes. Em primeiro lugar, a observação do mapa com os lineamentos que se distribuem irregularmente (Figura 4) revela que grande parte dos vulcões situam-se em locais onde não foi identificada a presença de tais feições. Desta forma, torna-se difícil supor que estes lineamentos possam ter exercido influência no condicionamento do vulcanismo.

Ao contrário, o exame do mapa com os sistemas N60E e N25W (Figura 3) mostra claramente que a presença dos vulcões coincide quase sempre com a ocorrência destes lineamentos, o que sugere que a localização do vulcanismo esteja relacionada à intersecção destes dois sistemas. Valenzuela et alii (1980), Brockman (1980) e Ponce e Avila (1980) concordam parcialmente com esta afirmativa e enfatizam a importância das intersecções no "emplacement" do magmatismo e das ocorrências mineiras.

Por último, as considerações aqui descritas poderão ser substancialmente ampliadas com a recente disponibilidade das imagens do Thematic Mapper. Assim, sugere-se que o trabalho seja estendido não apenas para outras áreas ou para áreas maiores, mas também para a identificação de padrões de condicionamento de possíveis mineralizações, com apoio de maiores informações de campo.

5. BIBLIOGRAFIA

- Ahlfeld, F.E. Geologia de Bolívia. La Paz, Editorial Los Amigos del Libro, 1972. (Enciclopedia Boliviana).
- Brockmann, C.E. Remote Sensing applications - Bolivian experience. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 14, San José, 1980. Proceedings. San Jose, ERIM, 1980, v.1, p.47-54.
- Liu, C.C. Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao Estado do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. São Paulo. Departamento de Geologia Geral e Aplicação do Instituto de Geociências, USP. 1984, 157p.
- Ponce, J.; Avila, W. Cenozoic volcanism, tectonics and metallogenesis of the Northern part of the Western Cordilhera, Bolivia. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 14. San Jose, 1980. Proceedings. San Jose, ERIM, 1980, v.3, p.1741-1742.
- Tectonic Map of South America 1:5000000; explanatory note. Brasilia, DNPM-CGMW-UNESCO, 1978.
- Valenzuela, R.; Ballon, R.; Claire, H.; Alcazar, F.; Cordova, J.; Valenzuela, J.; Michael, J.A.; Suarez, M. Natural resources integrated survey of the Oruro Department - Bolivia. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 14; San Jose, 1980. Proceedings. San Jose, ERIM, 1980, v.2, p.713-730.
- Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos/Servicio Geológico de Bolivia (YPFB/GEOBOL). Mapa Geológico de Bolivia. La Paz, 1978. escala 1:1000000.

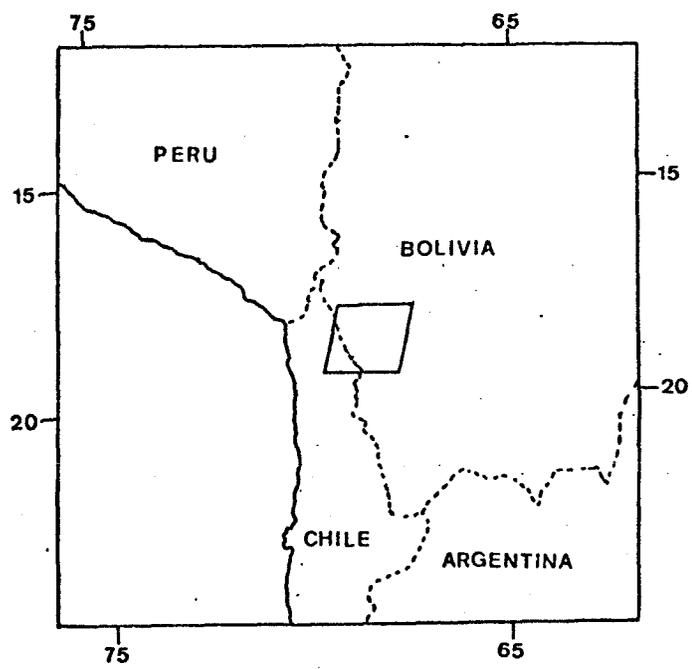


FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.

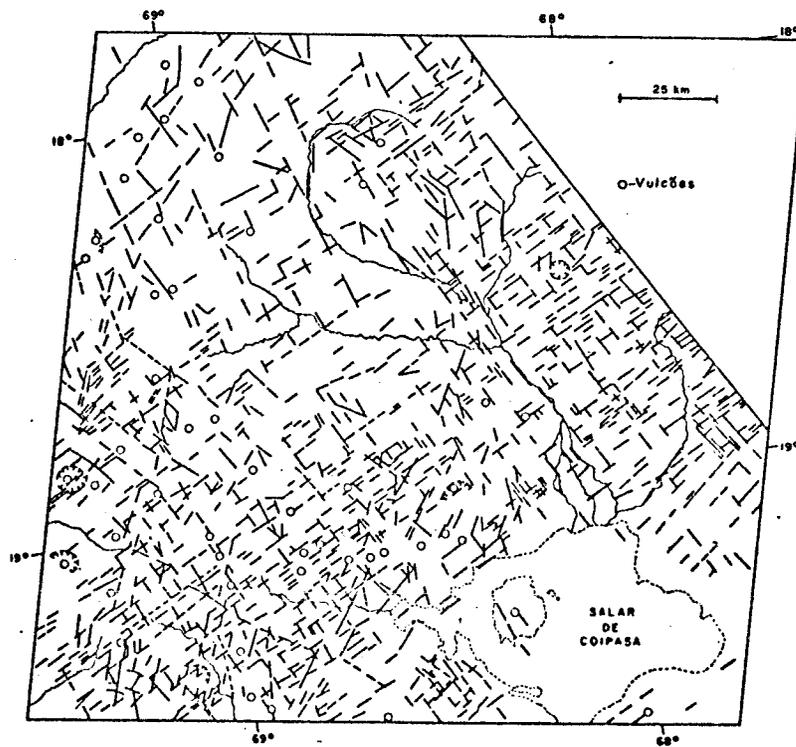


FIGURA 2 - MAPA TOTAL DOS LINEAMENTOS.

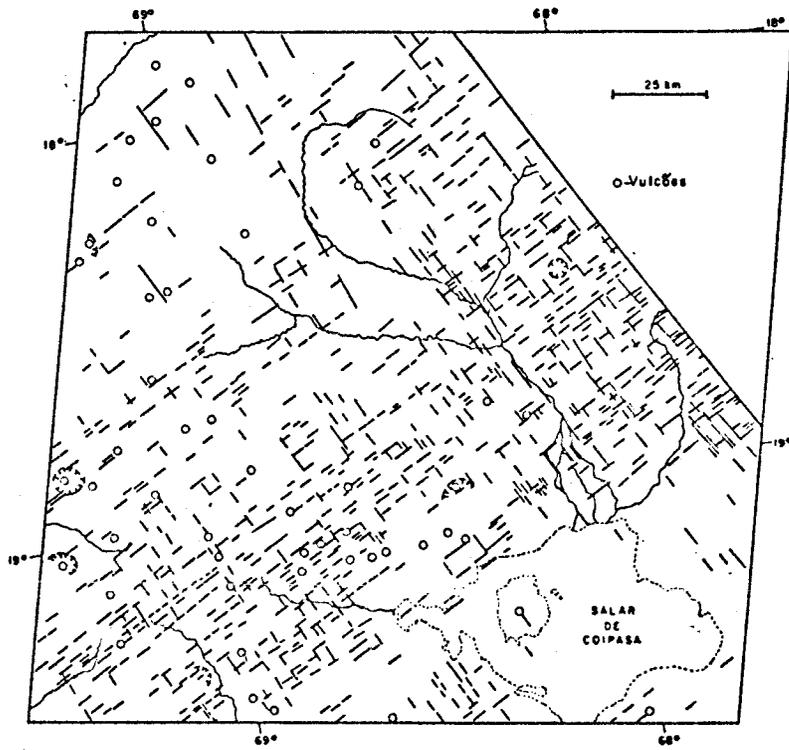


FIGURA 3 - MAPA DE LINEAMENTOS COM "TRENDS" N25W E N60E.

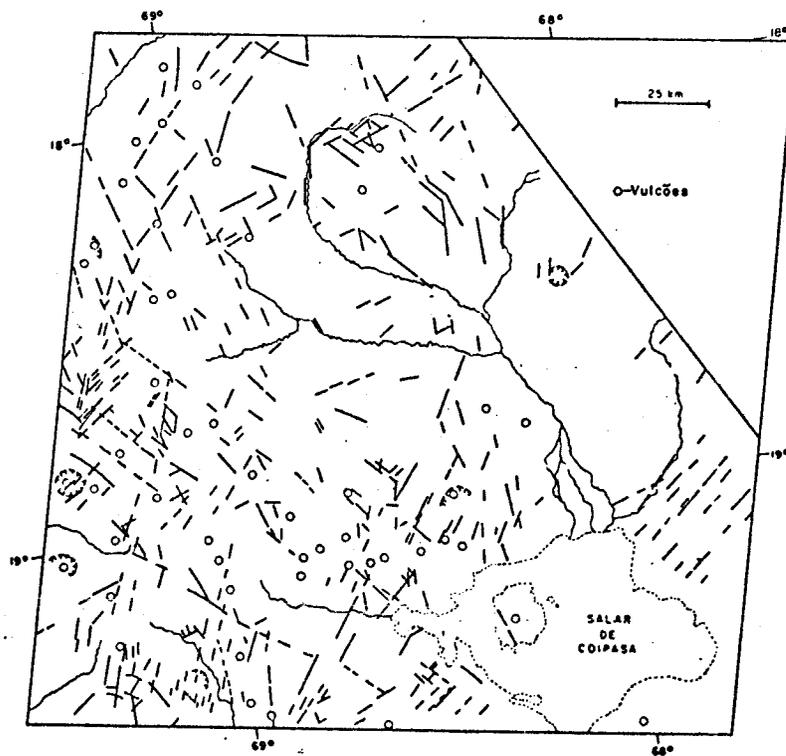


FIGURA 4 - MAPA DE LINEAMENTOS SEM "TREND". PREFERENCIAL.