

# MINERALIZAÇÃO DE URÂNIO LIGADA A METASSOMATISMO SÓDICO, ESPINHARAS, PARAÍBA

LUIZ CARLOS SURCAN DOS SANTOS\*

**ABSTRACT** In the Espinharas uranium deposit granitic rocks (granites and gneisses) had been altered by metassomatic processes including albitization and hematitization, with sodium and calcium addition, silica leaching and uranium enrichment. Country rocks are compared with their mineralised alteration products through geochemical and mineralogical changes. Geological setting and morphology of ore bodies are described. Disseminate coffinite is present in albitized rocks. Espinharas is placed among similar occurrences in northeast and relate to others brazilian and russian uraniumiferous metassomatites.

**INTRODUÇÃO** O Depósito de Espinharas, situado na localidade de São José de Espinharas no Estado da Paraíba, a 25 quilômetros da cidade de Patos (Fig. 1) se inclui entre as diversas ocorrências de urânio ligadas a metassomatismo sódico que se distribuem por quase todo o Nordeste.

Estas ocorrências embora apresentem características locais, que estão principalmente ligadas a natureza das rochas originais (gnaiesses, granitos, xistos ou calcários), possuem aspectos comuns que lhe são impostos pelo processo metassomático e envolvem principalmente aumento de sódio e cálcio, enriquecimento em fosfato e urânio e extensiva precipitação de  $Fe_2O_3$  sob a forma de hematita submicroscópica que empresta à rocha uma coloração típica róseo-avermelhada.

Os trabalhos de mapeamento geológico e os estudos do tipo de mineralização, que foram executados a fim de apoiar a avaliação das reservas geológicas, trouxeram importantes subsídios no esclarecimento dos processos geoquímicos ligados à mineralização de urânio.

No presente trabalho, estes dados de Espinharas são analisados e discutidos em confronto com demais ocorrências similares do Nordeste.

**GEOLOGIA REGIONAL, ESTRATIGRAFIA E TECTÔNICA** A área em questão se situa no bloco norte do lineamento de Patos, tendo sido mapeada dentro do Grupo Caicó (cf. Meunier 1964).

Nos trabalhos de Ferreira (1968), Ferreira & Albuquerque (1969) e Albuquerque (1970) foram definidos os Grupos Caicó e Seridó englobados na Série Ceará.

Estes trabalhos juntamente com os de Almeida (1967), Almeida *et al.* (1968), Brito Neves (1973), Jardim de Sá (1973) e Ebert (1967, 1969, 1970) constituíam as bases de informação da geologia regional na época.

Ferreira & Albuquerque (1969) dividiram a Série Ceará em dois grupos: Grupo Caicó incluindo migmatitos, meta-arcóseos, calcários e anfíbolitos situando-o no pré-Cambriano Inferior e o Grupo Seridó (pré-Cambriano Superior) subdividido nas Formações Equador, Jucurutu, Seridó e Cachoeirinha, utilizando-se as unidades quartzíticas como horizontes-guia.

O Grupo Caicó consistiria numa seqüência psamítica basal que inclui vulcânicas básicas, sobreposto por uma seqüência predominantemente pelítica, o Grupo Seridó, cuja unidade basal seria o Quartzito Equador.

Siqueira & Maranhão (1971, 1973) explicam esta seqüência metassedimentar como desenvolvida num ambiente de geossinclinal — definido como Geossinclinal do Seridó — que se alonga por mais de 150km numa direção geral N 15° E, sendo que a extremidade sul inflete na direção este-oeste contra o lineamento de Patos.

Os autores definiram um zoneamento envolvendo um antepaís contra o qual ter-se-iam desenvolvido sulcos e rugas ou/e miogeossinclinais, entretanto a estratigrafia apresentada pelos autores possuía profundas divergências como as apresentadas anteriormente.

Brito Neves (1973) interpretou a geologia do Nordeste como um mosaico constituído de altos tectônicos mais estáveis e faixas de dobramentos.

A região de Seridó, na qual se inclui a área estudada, foi considerada por Brito Neves como uma Faixa de Dobramento constituída de uma seqüência clástica terrígena formada por paragnaiesses, meta-arcóseos, anfíbolitos, metaconglomerados e quartzitos (Equador), esta seqüência progride para o topo em calcários e rochas calcossilicatadas.

Segundo Maranhão (1970) a deposição dos sedimentos que originaram a chamada Série Ceará ocorreu entre 750 a 1.100 Ma, inicialmente com um espesso pacote de arenitos passando gradualmente para sedimentos pelíticos com intercalações de calcários. Após uma fase erosiva deu-se nova deposição de sedimentos predominantemente pelíticos representados pelos gnaiesses e xistos do Seridó.

A primeira ação metamórfica teria ocorrido entre 700 a 750 Ma, desenvolvendo os primeiros padrões estruturais e culminando com intensa migmatização dos metassedimentos. Uma segunda fase de granitização se deu a 550 Ma com reativação de antigas falhas, redobramento dos metassedimentos, mineralização de rochas calcossilicatadas (tactitos).

É interessante comparar a interpretação dada por Maranhão à seqüência de eventos sugerida por Hasui *et al.* (1978) dentro do Ciclo Brasileiro.

\* NUCLEBRÁS — Empresas Nucleares Brasileiras S.A. — Superintendência-Geral de Prospecção e Pesquisa Mineral — SUPPM, Av. Presidente Wilson, 231 — 5º andar, CEP 20030, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

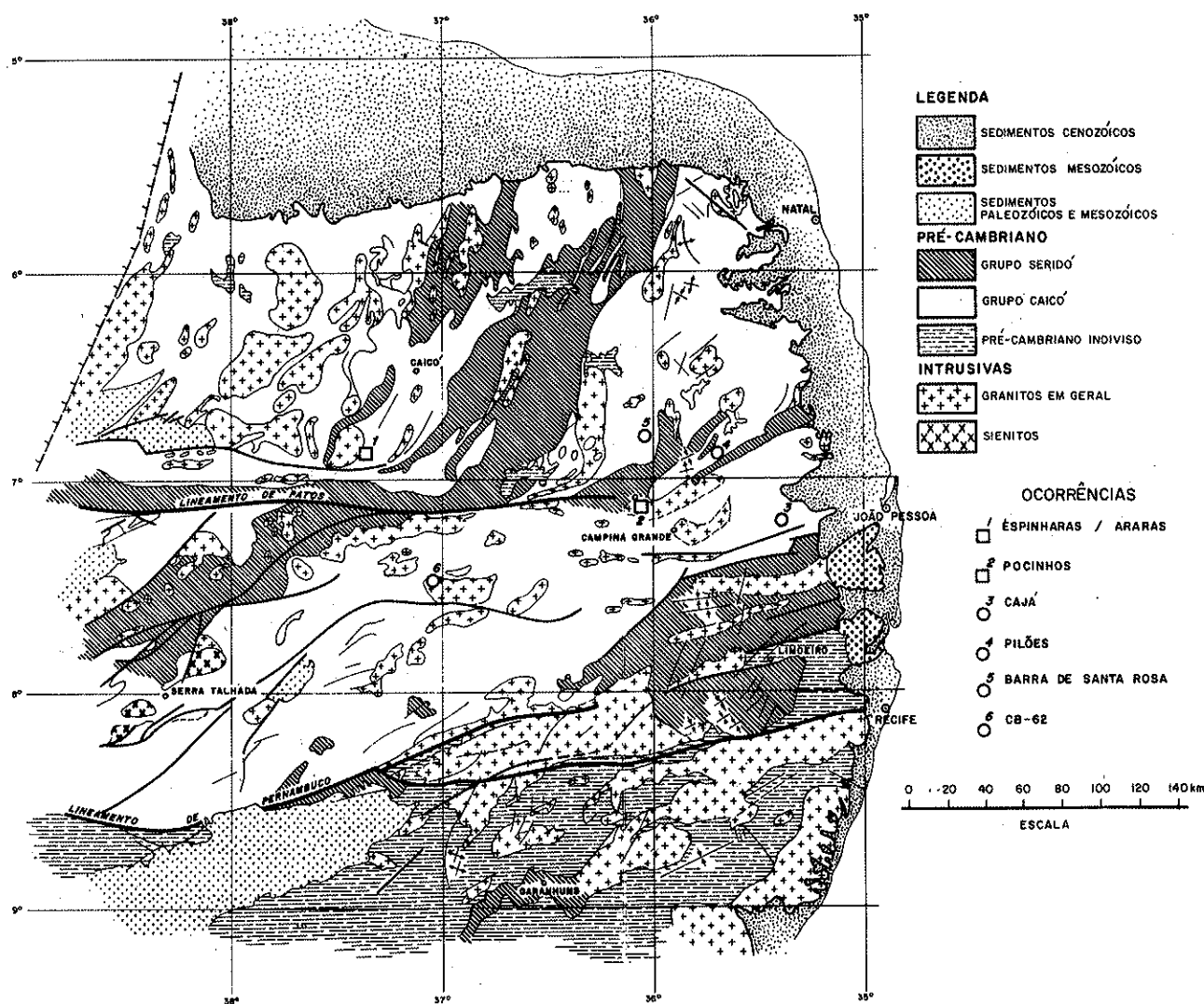


Figura 1 – Ocorrências uraníferas associadas a metassomatismo sódico no Nordeste (baseado nos mapas ao milionésimo SB,24 SB-25, SC-24 e SC-25. DNPM).

Para estes autores a região de dobramentos do Nordeste teria evoluído durante o Ciclo Brasileiro em três etapas distintas:

- Inicialmente (entre 700 e 1.000 Ma) ter-se-iam desenvolvidos sulcos e rugas ao longo de antigas e profundas geóclases propiciando a deposição de espesso pacote de sedimentos e algum magmatismo pré-tectônico.
- Numa fase intermediária (600 a 700 Ma) ocorreu extenso metamorfismo regional e migmatização seguida de intenso magmatismo.
- Numa etapa final, entre 450 a 600 Ma, instalaram-se fossas alojando depósitos de molassa com intrusões e derrames ácidos a básicos.

Sobreposto aos processos acima descritos, as rochas sofreram, em zonas definidas, ação de "stress" direcional com milonitização.

Este seria o quadro, segundo os autores citados, da região do Seridó, onde foram formados os metassomatitos sódicos com urânio.

É necessário situar o evento metassomático dentro da seqüência de metassedimentos e da evolução tectônica da região.

Cumpre mencionar que a mineralização do tipo metassomático, como o caso de Espinharas, não tem um controle estratigráfico entendido aí estar ligada a uma unidade litoes-tratigráfica bem definida na coluna, como é discutida em outra parte deste trabalho.

A delimitação das ocorrências de urânio metassomático no tempo geológico pode ser definida como sendo anterior ao tectonismo que deu origem as bacias intracratônicas (rift-valleys) formadores das sinéclises do Nordeste (Tucano, Jatobá, Araripe, etc) e posteriores à intrusão dos granitos tardiorogênicos, calcoalcalinos, definidos por Almeida *et al.* (1967) como granitos Itapetim (450 Ma).

Sendo um processo que ocorreu no final do Ciclo Brasileiro, associado ao tectonismo que deu origem aos granitos, a mineralização, em princípio, poderia ocorrer em toda a seqüência metassedimentar pré-cambriana já formada nesta época.

Entretanto, entre as anomalias estudadas, predomina a sua ocorrência em rochas do Grupo Caicó.

Em resumo a região do geossinclinal do Seridó pode ser dividida em dois grandes grupos de rochas, o primeiro intensamente migmatizado e granitizado com rochas mais antigas caracterizado por um sistema antigo de dobramentos e bandeamento, por sua vez deformado em fase posterior. Consiste principalmente de biotita-gnaiss, biotita-anfibólio-gnaisses, gnaisses facoidais e intercalações de lentes anfibolíticas, correspondendo ao *Grupo Caicó*.

O segundo grande grupo de rochas é uma seqüência metassedimentar mais nova e menos afetada pelo dobramento e migmatização, com diversas unidades litológicas que permitem uma subdivisão constituindo o *Grupo Seridó*.

Os trabalhos mais recentes convergem para a elucidação da complexa evolução da faixa de dobramento do Seridó como tendo sido sujeita a diversas fases de deformação (Jardim de Sá & Salim 1978, McReath & Jardim de Sá 1979).

O mais antigo evento de deformação provocou dobras isoclinais com plano axial pequeno a recumbente. O metamorfismo foi alto, atingindo em algumas faixas a anatexia, resultando em intensa migmatização nas seqüências basais. São típicos desta fase a produção de gnaisses porfiroblásticos, augen-gnaisses e rochas ricas em feldspatos resultante de secreção anatética.

A segunda fase de deformação é representada por dobramentos sinformes e antiformes com plano axial quase vertical. Esta fase provou um retrometamorfismo ao nível da facies xisto-verde.

Existem evidências de uma terceira fase de dobramentos, orientados numa direção N 70 E a E-W, que estariam ligados à última reativação dos grandes lineamentos transcorrentes.

**SITUAÇÃO GEOLÓGICA DO DEPÓSITO** Os trabalhos de campo envolvendo mapeamento de trincheiras, descrição dos furos de sondagem e sua interpretação, mapeamento geológico conjugado aos estudos petrográficos e geoquímicos indicam que o processo de alteração metassomática ao qual a mineralização em urânio está intimamente associada constitui um dos últimos eventos geológicos na área, sendo posterior a todos os tipos de rocha da área, inclusive às rochas graníticas intrusivas.

O processo de alteração metassomática afetou todas as litologias em graus variados em função de estruturas pré-existent.

Sendo assim, não existe um único tipo de litologia mineralizada distinta das demais rochas regionais. Ao contrário, todas as litologias existentes possuem seus equivalentes alterados metassomáticamente e portanto mineralizados.

É perfeitamente possível acompanhar, tanto em trincheiras ou afloramentos como nos furos de sondagem, a passagem gradual entre um tipo de rocha regional, digamos um biotita-anfibólio-gnaiss com teores normais em urânio e sódio e sem alteração, até o mesmo gnaiss profundamente alterado, albitizado e com teores elevados em urânio.

Esta observação é possível não só pela continuidade física, como pelo fato de que, nas rochas metassomatizadas, as texturas e estruturas originais foram preservadas, permitindo facilmente determinar a natureza da rocha antes da alteração.

Embora exista uma graduação contínua a regular entre uma rocha não alterada metassomáticamente e seu equiva-

lente alterado e mineralizado, esta passagem, na maioria das vezes, se dá em pequenas distâncias devido ao condicionamento estrutural dos processos metassomáticos.

Pelos motivos acima mencionados, foi adotada uma classificação das rochas de Espinharas na qual os diversos graus de alteração não foram individualizados, o que iria complicar desnecessariamente o mapeamento e delimitação das unidades, visto que as zonas de transição não teriam expressão espacial.

Para distinguir entre os vários tipos litológicos foi adotado um critério de identificação macroscópica da alteração metassomática, distinção esta plenamente corroborada pela variação na composição mineralógica e química das respectivas rochas.

As rochas alteradas metassomáticamente adquirem uma coloração rósea típica, devido à hematitização nos feldspatos e uma textura também característica, vacuolar (devido à dissolução do quartzo) que as distinguem das demais rochas. Estas rochas assim alteradas, invariavelmente, apresentam teores em urânio acima do background regional.

Foi portanto possível distinguir os tipos litológicos existentes na área em dois grupos principais: a) rochas regionais que existiam antes do evento metassomático e b) os equivalentes destas rochas alteradas metassomáticamente e mineralizadas em urânio, conforme o quadro abaixo:

Quadro 1: Tipos litológicos

Rochas Pré-Existentes (Regionais)	Equivalente Metassomatizado (mineralizado)
Biotita-anfibólio-gnaiss Granito-gnaiss Aplogranito Anfibolito	Gnaiss albitizado Albitito bandeado Albitito maciço Anfibolito "mineralizado"*

\* Este tipo de rocha embora contenha urânio não sofreu alteração metassomática como as demais.

**Rochas Regionais (Unidades Rochosas não mineralizadas)**

**BIOTITA-ANFIBÓLIO GNAISSE** Neste grupo foram incluídas rochas de textura, estrutura e composição variáveis mas que, fisicamente, se comportam formando extensas e uniformes interseções nos furos de sondagem.

Como são pouco resistentes ao intemperismo, raramente se apresentam como grandes afloramentos, entretanto predominam em subsuperfície e podem ser consideradas como as rochas predominantes na área.

Entre elas podem ser distinguidos *gnaisse porfiroblásticos*, *gnaisse xistosos* e *anfibólio xistosos*.

A primeira é uma rocha com textura porfiroblástica, constituída de plagioclásio, biotita, anfibólio, clorita e quartzo como minerais essenciais além de epidoto, titanita como constituintes menores.

*Gnaisse xistosos* constituem rochas de granulação fina, laminadas, de coloração escura e ricas em minerais máficos (biotita e anfibólio).

A proporção de quartzo nestas rochas é menor que nos *gnaisse porfiroblásticos*. Estas rochas pertencem ao mesmo

pacote metassedimentar dos pórfiro-gnaisses sendo aparentemente uma transição, cuja variação extrema são rochas bastante ricas em biotita e anfibólio, muito finas e lamina-das de caráter lenticular, tipicamente um *anfibólio xisto* de coloração cinza esverdeada.

Freqüentemente os gnaisses xistosos estão intercalados nos gnaisses porfiríticos podendo apresentar finas lâminas de material quartzo-feldspático, que sugerem uma incipiente migmatização.

Com exceção do teor em quartzo, eles podem ser considerados como variações finas do pórfiro-gnaisse, tendo a mesma composição mineralógica e química.

**GRANITO-GNAISSE** Estas rochas também se enquadram dentro do pacote gnáissico ocorrendo como intercalações dentro do biotita-anfibólio gnaisse.

Sua espessura varia de poucos centímetros até 30 metros, exibindo foliação paralela ao biotita gnaisse.

Embora em alguns casos apresentam extensa continuidade lateral servindo como guia local, usualmente estes níveis se adelgamam e acunham rapidamente, configurando a forma de delgados corpos lenticulares.

A sua composição mineralógica, que empresta à rocha coloração clara e textura granular, assim como o fato de ser mais facilmente alterada pelo metassomatismo, a tornam uma rocha conspícua em relação as demais.

Consiste essencialmente de quartzo, feldspato potássico (microclina), plagioclásio e biotita subordinada.

**APLOGRANITO** Este tipo litológico, embora não predomine em volume, ocorre com freqüência em superfície, sob a forma de diques ou pequenos sills.

Medidas estruturais tanto de superfície como em testemunhos de sondagem mostram que os corpos são predominantemente discordantes com a foliação do gnaisse.

O caráter intrusivo desta rocha é evidenciado pela atitude discordante dos diques e pela presença de xenólitos da encaixante.

A espessura dos corpos graníticos varia de poucos centímetros até alguns metros (excepcionalmente 15 metros), sempre com mergulhos pequenos (0°-20°) caindo para Sul.

É uma rocha clara (amarelada, rósea ou esbranquiçada) cuja coloração é fornecida pelo feldspato predominante. Apresenta-se quase sempre bandeada, sendo o bandeamto paralelo ao contato com as rochas encaixantes, causado por uma alternância de bandas finas (aplíticas) e grossas (pegmatíticas).

É composto essencialmente de quartzo (39 a 41%), plagioclásio (30 a 32%), microclina (21 a 26%) e subordinadamente biotita e clorita (1 a 4%) acessórios (epidoto, apatita, zircão e minerais opacos).

A textura é microgranítica ou granítica.

#### **ROCHAS BÁSICAS E ULTRABÁSICAS (ANFIBOLITOS)**

Existe um corpo contínuo no centro da zona mineralizada, que foi interceptado por vários furos de sondagem de uma rocha básica com pouca expressão na superfície, cuja composição e textura é bastante variável.

A sua granulometria varia de muito fina à grosseira quase pegmatítica. Em alguns casos, podem ser observados ainda cristais de olivina e piroxênio pouco alterados; na

maior parte a rocha está profundamente alterada e serpentinizada.

A composição mineralógica do tipo representativo da maior parte do corpo é predominantemente de plagioclásio (25 a 55%), hornblenda (1 a 60%) e biotita (5% a 36%); ocorrem como secundários titanita, epidoto, apatita e clorita, além de minerais opacos.

Efeitos de alteração são observados como cloritização da biotita e sericitização do plagioclásio. Ocorre ainda pequena quantidade de quartzo (75%) xenomórfico e intersticial.

**Rochas Mineralizadas** Podemos distinguir entre os metassomatitos mineralizados os seguintes tipos, em função da rocha originária (vide Quadro 1):

**ALBITITO MACIÇO** É o produto da alteração metasomática dos granitos. Devido à presença de grãos de quartzo numa textura equigranular, que foram removidos, a rocha resultante apresenta um aspecto poroso, com inúmeros vacúolos e quase sem quartzo (exceção ao quartzo secundário).

Estes vacúolos são preenchidos secundariamente por sílica livre (quartzo) e por carbonato (calcita).

Do ponto de vista mineralógico a rocha é constituída essencialmente de plagioclásio, predominantemente albita ou albita-oligoclásio que chega a 90% da rocha, alguma microclina remanescente da alteração, biotita, calcopirita e titanita;

**ALBITITO BANDEADO** É o resultado da alteração metasomática do granito-gnaisse, ou seja dos gnaisses mais ricos em quartzo e feldspato. Nestas rochas a foliação original é preservada após metassomatismo ou até acentuada pelo destaque das palhetas de mica e pela orientação dos vacúolos resultantes da dissolução do quartzo, que permanecem alinhados.

Difere do anterior pela foliação, apresentando entretanto a mesma coloração rósea a avermelhada e mesma composição mineralógica;

**GNAISSE MINERALIZADO** A diferenciação deste tipo mineralizado dos anteriores prende-se principalmente à textura original da rocha, que é preservada e, em parte, à maior proporção de minerais fêmicos.

A diferença entre um biotita gnaisse mineralizado e o não mineralizado é, a primeira vista, a coloração rósea do primeiro.

Entretanto, nestas rochas, não só houve dessilicificação, hematitização e albitização como houve alteração parcial, às vezes total, dos minerais ferromagnesianos.

A hornblenda, por exemplo, é substituída por anfibólitos sódicos (riebeckita e arfvedsonita) emprestando à rocha uma colocação azulada.

A biotita é parcialmente cloritizada.

Os minerais constituintes do gnaisse mineralizado são albita, hornblenda, (ou anfibólitos sódicos), clorita, biotita e epidoto, e como acessórios, apatita, titanita, pirita e calcita secundária;

**ANFIBOLITO COM MINERALIZAÇÃO** Na realidade raramente a rocha essencialmente anfibolítica apresen-

ta mineralização, talvez devido à sua permeabilidade menor e à pouca reatividade do anfibólito às soluções mineralizantes.

Excepcionalmente, em zonas de intenso fraturamento e, geralmente, em contato com corpos mineralizados, o anfibólito pode apresentar alguma mineralização que é, entretanto, restrita a zonas de fratura ou a pequenos filetes que penetram a rocha.

É mais um fenômeno de impregnação do anfibólito original ou alteração de bandas quartzo-feldspáticas dentro do anfibólito do que uma alteração própria da rocha.

**MINERALIZAÇÃO EM URÂNIO** A ocorrência de Espinharas não é um fenômeno isolado, pelo contrário, várias ocorrências no Nordeste apresentam características semelhantes, sendo que algumas foram estudadas em detalhe, tais como Araras, Pocinhos, CB-62, Pilões, Cajá e Barra de Santa Rosa, devido ao seu potencial uranífero (Fig. 1).

Em todas estas ocorrências, o aspecto comum é dado pelo metassomatismo sódico através da alteração que dá à rocha uma coloração avermelhada típica e textura vacuolar.

Embora as ocorrências acima mencionadas variam quanto à intensidade da alteração, teor médio de  $U_3O_8$  é ao tipo de rocha original, a natureza do processo é sempre a mesma, resultando num mesmo produto final uma rocha albitizada, enriquecida em  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$  e  $U_3O_8$ .

A introdução de urânio no sistema está diretamente ligada ao processo de alteração metassomática.

Não existe mineralização de urânio em rocha não metassomatizada, enquanto nos metassomatitos os valores em urânio passam do "background" (5 a 10 ppm  $U_3O_8$ ) a valores de 500 a 1.000 ppm  $U_3O_8$ .

As principais reações durante o processo metassomático são:

- Dissolução do quartzo até o seu total desaparecimento, deixando cavidades não preenchidas ou preenchidas parcialmente numa fase posterior por sílica ou calcita, dando à rocha resultante um aspecto vacuolar característico (dessilicificação). Este processo é mais intenso nas rochas graníticas, pela maior proporção de quartzo, assim como nas bandas leucocráticas dos granito-gnaisses;
- Alteração parcial ou total da biotita em clorita (cloritização);
- Liberação de  $Fe^{3+}$  de minerais ferromagnesianos, principalmente da biotita, e oxidação de  $Fe^{2+}$  em  $Fe^{3+}$  com formação de hematita sob a forma de minúsculas palhetas no plagioclásio, o que é responsável pela coloração rósea a avermelhada da rocha (hematitização);
- Substituição do feldspato potássico (microlina) por feldspático sódico albita (albitização).

Existem várias formas incipientes desta substituição, como bordas albitizadas na microclina, alteração parcial através de microfaturas, desenvolvimento de pertita, até o produto final em que a albita é turva.

Foram observados, também, microcristais neoformados de albita.

Do ponto de vista químico, há um constante e substancial aumento de  $Na_2O$  que é proporcional à perda de  $K_2O$ .

Na Tabela 1, apresentamos os resultados de análise química feita em um granito-gnaiss não alterado e no seu equivalente intensamente metassomatizado.

A morfologia dos corpos mineralizados do depósito uranífero de Espinharas é controlada, primariamente, por uma

Tabela 1 – Análise química (Rocha Total)

		A	B
Elementos maiores (%)	$SiO_2$	71,50	56,90
	$Al_2O_3$	12,70	13,10
	$Fe_2O_3$	2,20	4,00
	FeO	2,01	2,87
	CaO	1,20	4,70
	MgO	0,27	0,73
	$K_2O$	5,30	0,07
	$Na_2O$	3,45	6,30
	$TiO_2$	0,43	1,10
	$CO_2$	0,33	1,88
	$P_2O_5$	0,05	0,74
Elementos-traço (ppm)	$U_3O_8$	41	45.000
	$P_2O_5$	500	7.400
	$ThO_2$	30	5.760
	Y	35	2.480
	Yb	4	230
	Pb	100	1.000

A – Granito-gnaiss; B – Granito-gnaiss metassomatizado

Obs: Análise pela GEOSOL

Elementos maiores – Fluorescência de Raio-X

Elementos-traço – Espectrografia ótica de emissão, [fluorimetria (U) e via úmida (P)]

estrutura principal com direção aproximadamente N60E com mergulho de 45° para NW e largura de algumas centenas de metros que, em geral, limita a distribuição lateral da mineralização. Secundariamente e dentro do compartimento definido pela estrutura principal, a morfologia dos corpos é controlada pelas diversas litologias ali contidas e estruturas a elas relacionadas.

A estrutura principal estende-se em superfície ao longo de mais de 2 km de extensão com direção N60°E, com valores radiométricos anômalos irregularmente distribuídos. A partir da análise geológica dos dados de sondagem, principalmente nas seções transversais com furos verticais, foi possível inferir esse elemento estrutural planar com mergulho entre 45° e 50° para NW. A largura máxima observada dessa zona foi de 250m (Fig. 2).

A continuidade da mineralização ao longo do mergulho dessa estrutura foi determinada por furos de sondagem até a profundidade de 250m, sendo que a possibilidade de continuar a maior profundidade não foi investigada em virtude dos baixos teores encontrados.

Dentro da estrutura principal, a mineralização está espacialmente condicionada pelos corpos graníticos e pela foliação das rochas.

Esses corpos graníticos são intrusivos ao longo de um sistema de juntas bastante regular, com atitude sub-horizontal e serviram de planos de fraqueza por onde as soluções metassomáticas se difundiram. A combinação de diversos fatores deve ter contribuído para o desenvolvimento do metassomatismo em zonas preferenciais. Entre esses fatores podemos citar: natureza dos fluidos metassomáticos, (concen-

tração dos elementos) e reatividade das fases minerais das encaixantes; permeabilidade da rocha granítica e granito-gnáissica em função de condições estruturais (planos de alívio de pressão e abertura de espaços) que explicam a con-

figuração irregular dos corpos mineralizados. Os corpos mineralizados, resultantes desse controle, são de forma tabular, acompanhando a forma dos corpos graníticos e algumas vezes impregnando as rochas encaixantes (Fig. 3).

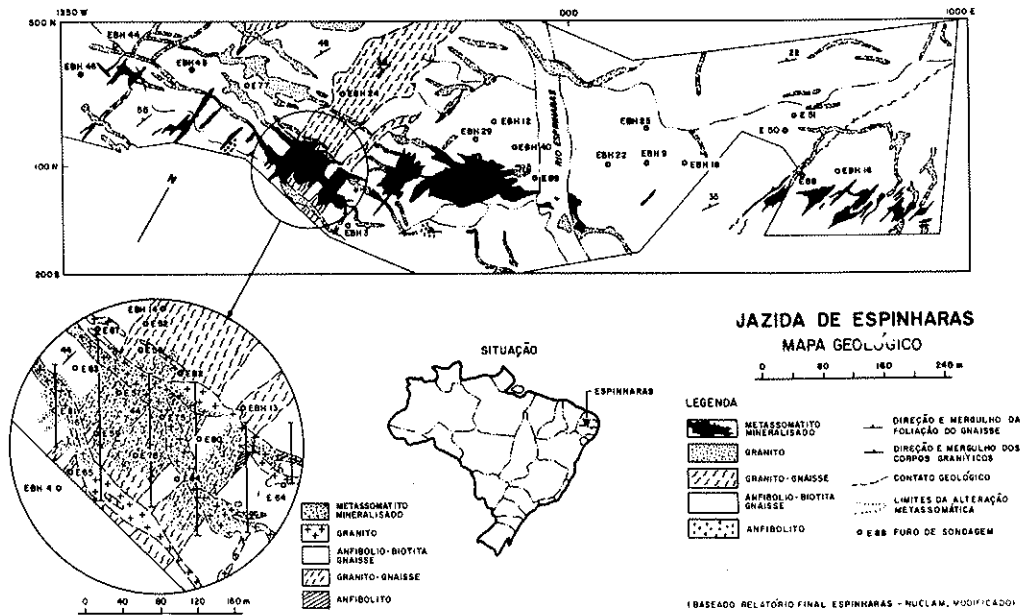


Figura 2 – Mapa geológico da jazida de Espinharas

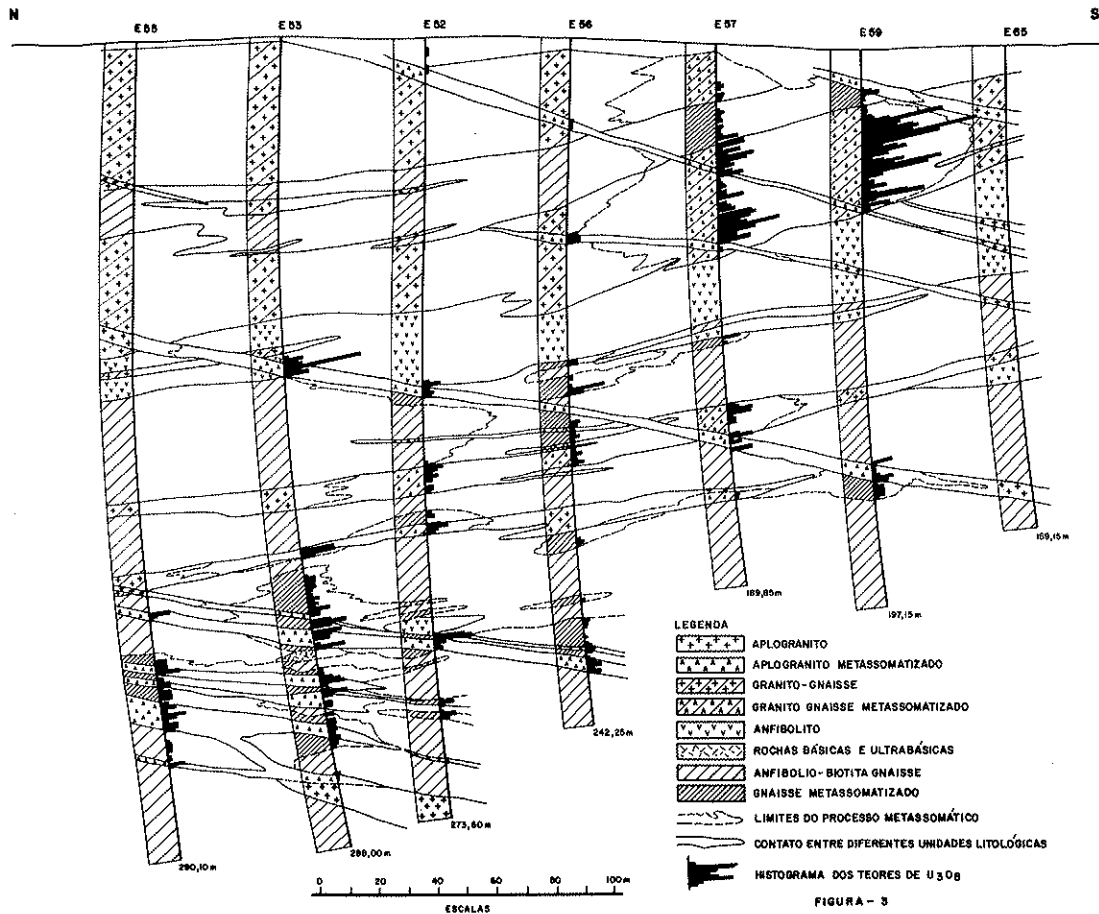


Figura 3 – Seção geológica transversal com furos de Sondagem (segundo Hoffmann 1979, modificado)

Um outro fator, de importância secundária na distribuição do metassomatismo, é a foliação regional da seqüência metamórfica, que tem direção uniforme N20°E e mergulha variando de 25 a 60° para NW. Também, na seqüência de rochas metamórficas, a conjugação de condições geoquímica e estruturais é importante, tendo-se notado que o metassomatismo desenvolve-se principalmente em rochas granítico-gnáissicas. A forma dos corpos metassomatizados nessa estrutura é lenticular, acompanhando a foliação regional.

Finalmente, os corpos metassomatizados assumem formas mais irregulares quando, no centro da zona principal, ocorre a intersecção de duas estruturas: corpos graníticos mergulhando para sul contra a foliação das rochas metamórficas para NW. Nesses casos, as formas mais comuns são bolsões em forma de "X", sendo intensa a ação metassomática afetando as rochas dessa área.

A Figura 4 apresenta um modelo possível da ação dos fluidos que provocaram a metassomatização. Este modelo é baseado em dados de furos de sondagem.

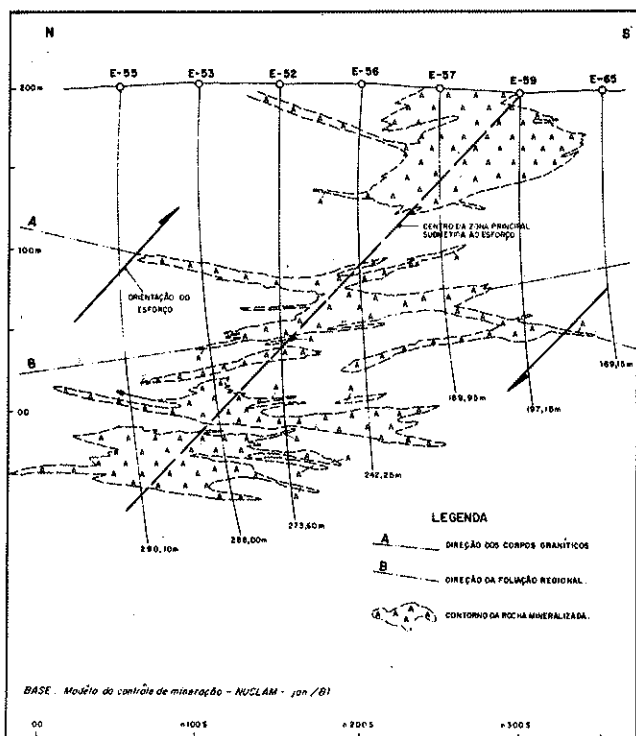


Figura 4 – Modelo do controle de mineralização no depósito de Espinharas

**ALTERAÇÕES QUÍMICAS DURANTE O METASSOMATISMO**

A fim de caracterizar as mudanças ocorridas durante o processo metassomático, foram feitos estudos mineralógicos das rochas de Espinharas (alteradas e não alteradas) conjugado a um estudo geoquímico das mesmas rochas.

Como já foi dito, todos os tipos de rochas se apresentam alterados metassomáticamente desde que estejam dentro do

compartimento estrutural onde um cisalhamento e fraturamento permitiu menor permeabilidade dos fluidos.

As principais reações químicas responsáveis pelas conspícuas alterações e pela maior mobilização de elementos são aquelas que envolvem a remoção da sílica e a mobilização dos elementos alcalinos (Na, K). Isto é observado na preferência da alteração pelos domínios dos minerais félsicos. As porções mais sensíveis à alteração nas diversas rochas são as bandas quartzo-feldspáticas dos gnaisses e as rochas graníticas. As principais mudanças de fases minerais seriam:

- **Quartzo** – removido por dissolução em soluções alcalinas. Parte da sílica é precipitada secundariamente, mas parte dela é removida do sistema;
- **Feldspatos potássicos** – o feldspato potássico (essencialmente microclina) é parcialmente alterado em albita, formando bordas de reação ou intercrescimento micropertítico, ou totalmente transformado em albita, pela reação:  $KAlSi_3O_8 + Na^+ \rightleftharpoons NaAlSi_3O_8 + K^+$ , com introdução de sódio e remoção de potássio;
- **Anfíbólio** – a alteração mais comumente observada é a substituição da hornblenda por anfibólios sódicos, riebeckita e arfvedsonita. Foi observada ainda a alteração parcial da hornblenda em biotita, com introdução de potássio;
- **Biotita** – a biotita, às vezes, se acha parcialmente cloritizada.

Outra reação importante é a remoção do ferro dos minerais ferromagnesianos (biotita, hornblenda etc...) e a formação de hematita em finíssimas palhetas dentro dos plagioclásios neoformados.

Em termos dos óxidos predominantes, as mudanças químicas significativas durante o metassomatismo são: diminuição acentuada de SiO<sub>2</sub> e K<sub>2</sub>O e aumento de Na<sub>2</sub>O e CaO.

O aumento em sódio e diminuição de potássio está ligado à substituição entre estes elementos e conseqüente formação de albita.

O aumento em CaO está intimamente associado a um aumento em CO<sub>2</sub>, com a neoformação de carbonatos (calcita) (Tab. 2).

Tabela 2 – Alterações químicas do Granito pelo metassomatismo (% peso)

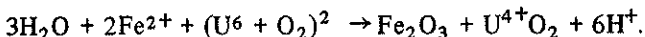
	I	II	III
SiO <sub>2</sub>	75,00	71,70	62,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,60	16,10	16,27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,54	0,49	2,90
FeO	0,40	0,21	0,40
CaO	0,77	0,38	3,40
MgO	0,09	0,33	0,34
Na <sub>2</sub> O	2,79	5,37	9,25
K <sub>2</sub> O	4,79	4,48	0,23
TiO <sub>2</sub>	0,11	0,08	0,09
CO <sub>2</sub>	0,05	0,05	2,15
P.F.	0,43	0,45	2,40

- I – Granito não alterado
- II – Granito parcialmente alterado
- III – Metassomatismo oriundo de granito.

Obs.: Análise p/N. Mickleley (PUC-RIO). Espectrografia ótica de emissão e fluorescência por Raio-X.

Finalmente, existe um acréscimo de  $Fe^{3+}$  que é resultante da oxidação do ferro ferroso dos minerais ferromagnesianos com formação de hematita microcristalina.

Como existe uma relação entre o grau de hematitização e a presença de urânio, podemos admitir que a precipitação inicial do urânio disseminado estaria ligado a uma reação de oxidação-redução como:



Na Tabela 1, é mostrada a variação na composição global entre um granito e seu produto de alteração mineralizado em urânio.

Entre os elementos traço é notado um aumento de  $P_2O_5$  e de urânio além de elementos de terras raras como Y e Yb.

**CONCLUSÕES** Fica difícil caracterizar geologicamente o depósito de Espinharas fora do contexto de outras ocorrências de metassomatitos uraníferos e sem abordar o processo de albitização.

A natureza do processo de metassomatose sódica (albitização) foi abordada em relatórios internos e trabalhos publicados por técnicos da NUCLEBRAS, referindo-se particularmente à jazida de Itataia, no Ceará (Angeiras *et al.* 1981, Forman & Angeiras 1981).

Fora do Brasil, são descritas ocorrências de urânio ligadas a metassomatismo sódico na União Soviética (Ucrânia, Krivoy Rog).

Baseado na descrição de autores russos dos albititos uraníferos da União Soviética (Kazansky, V.I. & Lverov, N.P. 1977, Tarkhanov, O.V. 1975, Kazansky, V.I. *et al.* 1977) é possível resumir as características destes depósitos como abaixo:

- O controle da mineralização tem um caráter predominante estrutural;

As zonas de albitização estão associadas a zonas de fraqueza da crosta terrestre ligadas a falhas profundas e a seguidas regenerações tectônicas (com cisalhamento e brechação);

- O desenvolvimento do processo de metassomatose alcalina não é nem contínuo nem linear. A albitização, e demais reações associadas, ocorre em fases intercaladas e dependentes de reativações tectônicas, produzindo dissolução de minerais já formados e neoformação com diversas gerações;

- Os metassomatitos variam de textura, em função da rocha original (granitos, gnaisses, pegmatitos ou migmatitos), e variam de composição em função da intensidade e do número de fases de alteração.

- A mineralização uranífera, originalmente disseminada, tende a se localizar nas zonas de fraturamento (fendas de distensão) nas partes centrais dos corpos albitíticos.

Gretchisnikov *et al.* (1971) descreve metassomatitos sódicos do Proterozóico Inferior da URSS nos quais estabelece uma seqüência paragenética dos minerais. Esta seqüência pode ser dividida em estágios de formação dos minerais separados por intensas reativações tectônicas.

Segundo Gretchisnikov, a seqüência paragenética pode ser resumida da seguinte forma:

#### 1ª Fase

- Formação de *clorita* por substituição a partir da biotita e de outros minerais ferromagnesianos,

- Formação de *albita* por substituição a partir da microclina e do plagioclásio,
- Alteração do piroxênio, formação de *anfíbólio sódico*,
- Precipitação de minerais de urânio;

#### 2ª Fase

- Precipitação de urânio ligado a urano-titanatos,
- Intensa formação de *hematita*,
- Continua, de forma declinante, a neoformação de *albita* (remobilizando a *albita* já formada), *clorita* e *anfíbólios*;

#### 3ª Fase

- Intensa silicificação (precipitação de quartzo em veios) e, finalmente, desenvolvimento de veios de carbonatos e também de sulfetos.

Sobre Espinharas foram publicados dois trabalhos por geólogos da NUCLAM. Ballhorn *et al.* (1981) descreve a geologia local e discute a mineralização em Espinharas, mencionando o processo de albitização associado à mineralização uranífera.

A rocha mineralizada é denominada, pelo autor, de "rocha feldspática" ocorrendo, segundo Ballhorn, como "diques" e "veios".

Fuchs *et al.* (1981) descreve o depósito e os métodos de prospecção utilizados, e comenta a sua viabilidade econômica.

Os dados em que se basearam os autores acima mencionados foram obtidos antes da última campanha de sondagem feita na área, realizada após detalhada revisão e reinterpretação dos dados anteriores (Hoffmann & Siegers 1979), e em estudos geológicos e petrográficos (Grossi Sad 1979) que modificaram substancialmente a interpretação da morfologia dos corpos mineralizados assim como a natureza das rochas mineralizadas e sua distribuição espacial.

Sarcia (1980), descrevendo diversas ocorrências de albititos uraníferos, situa Espinharas num grupo de depósitos de urânio associados à tectônica rígida em zonas orogênicas, compreendendo embasamento e cobertura, com metamorfismo, granitização e magmatismo relacionados ou em que a tectônica rígida é francamente post-orogênica. Netto (1983) situa a jazida de Itataia dentro da mesma classificação.

Em Espinharas, o urânio ocorre sob a forma de *coffinita* microcristalina disseminada nas rochas metassomatizadas (Oliveira 1979).

O urânio ocorre ainda em zonas definidas de brechas tectônicas, com teores bastantes elevados (3% a 4,5%), onde fragmentos de rocha albitizada estão cimentados por uma matriz argilo-carbonática bastante silicificada.

O que caracteriza o depósito de Espinharas dentro do quadro geral das ocorrências uraníferas ligadas a metassomatismo sódico são:

- A mineralização de urânio é disseminada ocorrendo sob a forma de *coffinita* microcristalina nas rochas albitizadas;

- A formação de fosfatos é incipiente (apenas alguma colofana é encontrada preenchendo cavidades);

- As reações que caracterizam a rocha mineralizada são: dessilicificação, albitização e principalmente hematitização, produzindo uma rocha avermelhada semelhante ao "episnito" descrito em Itataia. É importante notar o aumento de



ferro férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nos metassomatitos em relação às rochas das quais se originaram (Tab. 1 e 2), correspondendo essencialmente à formação de hematita;

● É nítido o relacionamento dos corpos mineralizados com falhas de distensão secundárias ("tension gashes").

Embora existam vários trabalhos sobre as ocorrências de urânio ligadas a metassomatismo sódico, o assunto está longe de ter sido esgotado, fazendo-se necessária uma classificação geral destas ocorrências dentro da característica comum a todas, que é o fenômeno de albitização.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J. do P.T. - 1970 - *Inventário hidrogeológico básico do Nordeste*, Folha 15 Jaguaribe-SE. Recife SUDENE, Div. Docum. 18 p. (Brasil, SUDENE, Hidrogeologia, 32).
- ALMEIDA, F.F.M. de - 1967 - *Origem e evolução da plataforma brasileira*. DNPM, DGM 36p (Bol. 241), Rio de Janeiro.
- ALMEIDA, F.F.M. de; LEONARDOS, Jr. O.H.; VALENÇA, J. - 1967 - Review on granitic rocks of the Northeast South America. In: Field Symposium on the gaites and basement of Northeastern Brazil and their comparison with those of West Africa. UNESCO/IGUS, Spec. Publ., 41p.
- ALMEIDA, F.F.M. de; MELCHER, G.C.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; VANDOROS, P. - 1968 - Radiometric Age determinations from Northern Brazil. *Bol. Soc. Bras. Geol.* 17 (1): 3-14.
- ANGEIRAS, A.G.; NETTO, A.M.; CAMPOS, M. de - 1981 - Phosphono-uraniferous mineralization associated to sodium-episyenites in the Ceará Precambrian (Brazil) (IAEA-AG-162/29). In: Uranium Deposits in Latin America: Geology and Exploration. *Proceedings of a Regional Advisory Group Meeting in Lima*, (1978) Intern. Atomic Energy Agency, Vienna.
- BALLHORN, R.K.; THAKUR, V.K.; FONTE, J.E.C. da; SUCKAU, V. - 1981 - Geology of the Espinharas uranium deposit, Brazil (AG. 162/27). In: Uranium Deposits in Latin America: Geology and Exploration. *Proceedings of a Regional Advisory Group Meeting Lima, Peru* (1978) IAEA, Vienna.
- BRITO NEVES, B.B. - 1973 - Elementos da geologia pré-cambriana do Nordeste Oriental. In: CONGR. BRAS. GEOL., 27, Aracaju, 1973. Anais. . . Aracaju, SBG, V. 2, p.105-134.
- EBERT, H. - 1967 - Observações sobre a subdivisão estratigráfica e a idade do pré-cambriano no Nordeste brasileiro. *Eng. Miner. Metal.* 46 (273): 111-112.
- EBERT, H. - 1969 - Geologia do alto Seridó. *Nota Explicativa à Folha Geológica Currais Novos 1:250.000*. Sudene. Geologia Regional Boletim nº 11, 93 p.
- EBERT, H. - 1970 - The precambrian geology of the "Borborema belt" (states of Paraíba and Rio Grande do Norte, NE Brasil) and the origin of its mineral provinces. *Geol. Rundsch.* 59 (3): 1292-1326.
- FERREIRA, J.A.M. - 1968 - Geologia da Quadrícula Caió. Folha E 062. Rio Grande do Norte e Paraíba. Sudene. Geologia Regional, Boletim nº 5, 64 p.
- FERREIRA, J.A.M. & ALBUQUERQUE, J. do P.T. - 1969 - Síntese da Geologia da Folha Seridó. Sudene. Geologia Regional, Boletim nº 18, 47 p. Recife.
- FORMAN, J.M.A. e ANGEIRAS, A.G. - 1981 - Poços de Caldas and Itataia: Two cases histories of uranium exploration in Brazil (IAEA, AG. 250/14). In: Uranium Exploration Case Histories. *Proceedings of an Advisory Group Meeting*. Vienna (1979) Intern. Atomic Energy Agency.
- FUCHS, H.D.; FONTE, J. da; SUCKAU, V.; THAKUR, V. - 1981 - The Espinharas Uranium Occurrence, Brazil (IAEA-AG 250/2). In: Uranium Exploration Case Histories. *Proceedings of an Advisory Group Meeting*. Vienna (1979) Intern. Atomic Energy Agency.
- GRETCHISNIKOV, N.P.; RAKOVITCH, F.I.; ZINTCHENKO, V.A.; KRAMAR, O.Q. - 1971 - Composição mineral, características texturais, estruturais e estágios da mineralização uranífera nos metassomatitos sódicos - *Jornal Geológico*, T. 31, vol. 1 p. 121-131 - (Tradução de A.L. Vanuzzi - NUCLEBRÁS).
- GROSSI SAD, J.H. - 1979 - *Albititos e estrutura geológica de Espinharas, Paraíba, Brasil*. Relatório Interno - GEOSOL/NUCLAM V. I e II.
- HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. de; BRITO NEVES, B.B. - 1978 - As estruturas brasileiras. In: CONGR. BRAS. GEOL., 30, Recife, 1978. Anais. . . Recife, SBG, V. 6, p.2423-2437.
- HOFFMANN, U.H. & SIEGERS, A. - 1979 - Valuation Report I - Espinharas. NUCLAM-Nuclebrás Auxiliar de Mineração S.A. (Relatório Interno). Rio de Janeiro
- JARDIM DE SÁ, E.F. - 1973 - *Geologia de parte das regiões do Seridó e Borborema*. UFPe. Inst. Geoc., 2 V. Recife.
- JARDIM DE SÁ, E.F. & SALIM, I. - 1978 - Reavaliação dos conceitos estratigráficos na região do Seridó. (RN-PB). In: CONGR. BRAS. GEOL, 30, Recife, 1978, SBG, Bol. 1, p. 125.
- KAZANSKY, V.I. & LAVEROV, N.P. - 1977 - *Deposits of Uranium*. In: "The Deposits of URSS", Smirnov (ed) vol. II, pp. 349-424.
- KAZANSKY, V.I.; LAVEROV, N.P.; TUGARINOV, A.I. - 1977 - Sources of ore material in endogenic uranium deposits. *Intern. Geology Review*, 19 (3) pp. 283-293.
- MARANHÃO, R.J. - 1970 - *Geologia econômica da região de Currais Novos (RN)*. Tese de Doutorado - Inst. Geoc. USP. 135 p. São Paulo.
- McREATH, I. & JARDIM DE SÁ, E.F. - 1979 - Datações geocronológicas das rochas policíclicas. Interpretação alternativa para os dados do Seridó (RN-PB). In: SIMP. GEOL. NORDESTE, 9, Boletim Especial.
- MEUNIER, A.R. - 1964 - Succession stratigraphique et passages lateraux dus au metamorphisme dans la serie Ceará, ante cambrien du nordest bresilien. *C.R.Acad. Scie. Paris* (259): 3796-3799.
- NETTO, A.M. - 1983 - *Contributions a la Mineralogie, a la Petrographie e à la Metallogenie du gisement phospho-uranifere d'Itataia Ceará, Brésil*. Thèse de Docteur d'Université. Université de Clermont II. France.
- OLIVEIRA, G.N.M. - 1979 - *Estudos sobre a distribuição da radiatividade e identificação de minerais radioativos em rochas uraníferas de Espinharas (PB)*. Tese de Mestrado. Pont. Univers. Católica, Depto. Química. Rio de Janeiro.
- SARCIA, J.A. - 1980 - L'Uranium des albitites, Commun. 13/0028, Symposium 13/2.03. In: CONGRÈS GEOLOGIQUE INTERNATIONAL, 26, Paris.
- SIQUEIRA, L.S. & MARANHÃO, R.J.L. - 1971 - Novas considerações sobre a geologia da região do Seridó. *Assoc. Geol. Pern., Rev. 1* (1): 41-45.
- SIQUEIRA, L.S. & MARANHÃO, R.J.L. - 1973 - O zoneamento e a estratigrafia do geossinclinal do Seridó. In: CONGR. BRAS. GEOL, 27, Aracaju, *Resumos Bol.* 2, pp. 44-46.
- TARKHANOV, O.V. - 1975 - "Presença de urânio nos Albititos do pré-Cambriano". *Jornal Geol.*, t. 35 nº 5, Moscou (Tradução A.L. Vanuzzi). CENDOC/SUPPM/NUCLEBRÁS (BG 1/1779/81).

MANUSCRITO

Recebido em 07 de maio de 1984

Revisão aceita em 15 de fevereiro de 1985

O que marca uma revolução científica não são os novos dados, mas sim, uma mudança de perspectiva.

Kuhn, T.J. - 1964 - *The Structure of Scientific revolutions*. Univ. of Chicago Press, 172 p.