

**ESTIMATIVA DOS TEORES DE URÂNIO A PARTIR DOS REGISTROS GAMA EM FUROS DE SONDAAGEM**

Branly Julião

NUCLEBRÁS/RJ

**ABSTRACT**

Radiometric grade of uranium deposits can be determined from drill hole gamma logs. The calculation of uranium oxide content can be obtained with good precision when the uranium ore is in radioactive equilibrium, containing only a small amount of thorium and no interference of potassium. This is the case of uranium ore from the Lagoa Real Uranium Province presented in this paper.

The radioactive disequilibrium study in this province were made working over nine hundred samples analysed with this special purpose in the CDTX - NUCLEBRAS laboratories. The data obtained indicated that the uranium in the ore is in perfect equilibrium with their daughter gamma emitters. Furthermore, the amount of Th and K is of no significance, so that the gamma counting represents exactly the uranium content of the ore.

**INTRODUÇÃO**

Os estudos de desequilíbrio radioativo realizados em jazidas da Província Uranífera de Lagoa Real, revelaram o perfeito estado de equilíbrio radioativo do urânio contido em rocha sã.

A reduzida quantidade de tório e a insignificante influência do potássio na contagem gama, aliadas ao fato do minério de urânio estar em equilíbrio, são fatores favoráveis e que certamente irão facilitar também nas etapas de desenvolvimento e lavra das jazidas existentes nessa província uranífera.

Apenas nas zonas mais alteradas, normalmente bem próximas à superfície, será recomendável verificar os valores dos teores radiométricos, mediante a utilização de métodos analíticos adequados.

É importante frisar, que embora o fenômeno do desequilíbrio radioativo entre os principais emissores gama e o urânio metal esteja aqui sempre relacionado às rochas alteradas por intemperismo, oxidadas e/ou fraturadas, a recíproca não é verdadeira, ou seja, nem toda rocha intemperizada apresenta minério de urânio fora de equilíbrio.

A cobertura de solo coluvionar e aluvião é muito pequena e pode ser considerada como desprezível, quando comparada ao gigantesco volume dos corpos mineralizados que se estendem a centenas de metros de profundidade em várias jazidas dessa província uranífera.

Nas passagens intemperizadas dos corpos de minério, existem algumas amostras com urânio em desequilíbrio radioativo, o qual é variável e, em geral, de baixo grau; o desequilíbrio ocorre, tanto em locais com baixo teor, como com alto teor e essa observação sugere que realmente não há qualquer relação entre a magnitude do desequilíbrio e a ordem de grandeza do teor de urânio.

Os estudos comparativos de espessuras em milhares de intervalos mineralizados, revelaram também que as espessuras indicadas pelos registros gama coincidem perfeitamente com aquelas obtidas das amostras

tras de testemunhos. Na quase totalidade dos casos, praticamente não há erro e quando há discrepâncias de espessuras, elas são em geral inferiores a 25 centímetros, que é a extensão normalmente utilizada na coleta das amostras de testemunho de sondagem.

Após essa importante constatação, os registros gama passaram a auxiliar também na verificação e no controle das espessuras dos intervalos mineralizados, possibilitando várias correções no posicionamento das amostras, quando trocadas ou mal acondicionadas nas caixas de testemunhos. Além disso, em alguns poucos casos em que a recuperação dos testemunhos foi baixa, os registros gama possibilitaram também a determinação dos teores em urânio, graças às fórmulas desenvolvidas para estimar o teor de urânio "U" a partir do teor radiométrico "G" do Perfil Gama.

Conforme foi dito anteriormente, a quase totalidade do minério de urânio está em rocha sã e em perfeito estado de equilíbrio radioativo, ou seja, os nuclídeos descendentes do  $U^{238}$  e que são emissores de raios gama, refletem fielmente o conteúdo do metal urânio.

A existência de perfeita relação entre a radiometria e o real teor em  $U_2O_5$  já foi exaustivamente comprovada e, particularmente no caso dos equipamentos de perfilagem, foi possível estabelecer uma única e simples fórmula do tipo  $U = a (G)^b$ , que dá o teor de urânio "U" em função do teor radiométrico "G" do Perfil Gama.

Estudos estatísticos mostraram que o erro padrão da estimativa usando essa fórmula é consideravelmente baixo a um nível de confiança elevado (95%), particularmente na faixa de teores entre 1.000 e 5.000 ppm  $U_2O_5$ . A aplicação da regressão linear simples em centenas de intervalos, revelou o ajuste com curva de potência como sendo o mais apropriado para representar a relação funcional entre as variáveis "U" e "G"; como as equações para as várias anomalias e jazidas foram se apresentando equivalentes, à medida que o volume de dados disponíveis foi aumentando, foi possível finalmente reunir todos os 826 pares de dados "U" e "G" e estabelecer uma fórmula geral única, aplicável a toda a Província Uranífera de Lagoa Real.

#### CONSIDERAÇÕES GERAIS E RESULTADOS OBTIDOS

O conhecimento do estado de equilíbrio radioativo de um minério uranífero é necessário e importante, não só para a exploração e lavra da jazida, como também para auxiliar em estudos de geoquímica, metalogenia e geocronologia. No caso presente, o enfoque recai apenas sobre o desequilíbrio que interessa aos trabalhos, visando a determinação dos teores para a exploração e lavra das jazidas, ou seja, cabe aqui verificar se existe ou não relação apropriada entre os principais emissores gama e o urânio metal ( $U^{238}$ ).

A série de decaimento radioativo do elemento urânio 238 pode ser considerada em equilíbrio, quando o número de átomos de cada nuclídeo produzido for igual ao número de átomos do mesmo nuclídeo que está sendo perdido por desintegração radioativa. Em outras palavras, há equilíbrio radioativo quando existe quantidade proporcional entre o metal urânio e seus nuclídeos descendentes, como o radônio, o rádio, o bismuto, etc.

Em Lagoa Real, as amostras foram coletadas em grande número e procurou-se distribuí-las apropriadamente, para bem representar as jazidas estudadas. O número de amostras selecionadas na Jazida Cachoeira foi superior a 300 amostras e no estudo da Jazida da Rabicha acima de 600, de modo que o número total na província uranífera é da ordem de 1.000 amostras, número que foi suficiente para comprovar definitivamente o perfeito estado de equilíbrio na rocha sã. É conveniente registrar aqui, que o pequeno e muito local desequilíbrio encontrado no solo e na rocha alterada é inexpressivo em termos de jazida como um todo.

Os métodos de análises utilizados em laboratório para a realização do presente estudo de equilíbrio radioativo foram a espectrometria gama (EG) e o de nêutrons retardados (NR), que normalmente são os métodos analíticos básicos para esse tipo de estudo.

Aqui convém lembrar e ressaltar, que no caso da estimativa dos teores de urânio a partir dos registros gama, é necessário que se tenha conhecimento dos fenômenos geradores dos vários tipos de desequilíbrio radioativo existentes nos depósitos uraníferos, a fim de evitar futuros equívocos na quantificação do conteúdo real do metal urânio, que é um problema de avaliação de reservas que já ocorreu em algumas jazidas no mundo.

No caso da Província Uranífera de Lagoa Real, a predominância quase total do estado de equilíbrio é mostrada, tanto nos gráficos NR versus EC (figuras 1 e 2), como nos histogramas ilustrados nas figuras 3 e 4.

A observação das figuras 5 e 6 ilustra que, quando há desequilíbrio radioativo, ele é positivo e de pequeno grau. O bloco diagrama esquemático (figura 7) procura mostrar os mecanismos que promoveram o aparecimento desse desequilíbrio, contraditório particularmente nas zonas de intemperismo. Basicamente, o mais importante foi a perda do gás radônio para a atmosfera e, em escala bem menor, a dissolução do rádio em águas cloretadas; ambos os fenômenos atuaram no mesmo sentido, acarretando um enriquecimento relativo do metal urânio em relação aos elementos filhos emissores de raios gama.

Evidentemente, as águas meteóricas infiltradas no manto tiveram um papel importante na dissolução e no carreamento do urânio para níveis mais profundos. Outros fenômenos físico-químicos de menor expressão também devem ter ocorrido. A circulação de águas dentro do solo atuou de várias formas sobre o urânio e alguns de seus elementos descendentes. Houve lixiviação diferencial de vários elementos, inclusive do urânio, que acabou se precipitando mais nas zonas redutoras próximas à base do manto junto ao contacto com a rocha sã.

Fluxos hidrodinâmicos em várias direções, inclusive ascendentes, devem ter promovido vários tipos de fenômenos. Esse processo gradativo de acumulação de urânio deve ter sido bem mais acentuado nas estações das secas, com o rebaixamento do nível hidrostático; nesses períodos, o solo acabava ficando praticamente seco, com o espaço poroso aerado e livre para a circulação e liberação do gás radônio.

A existência de um clima tropical, quente e semi-úmido e com duas estações bem definidas (seca e chuvosa), aliada ao fato dos riachos intermitentes que ocorrem na região, formam um contexto compatível com as propostas apresentadas para explicar os desequilíbrios no manto. Completando o quadro favorável para explicar os fenômenos propostos neste trabalho, deve-se ressaltar que a taxa de evaporação é intensa e a precipitação pluviométrica é considerável em toda a região durante um curto período de cada ano. Outro fator que também deve ter favorecido um pouco, é o fato da escassa vegetação existente na maior parte da área (cerrado e caatinga), que deve ter facilitado ainda mais a perda de certos nuclídeos, particularmente do radônio nas épocas de estiagem.

Há indícios evidentes de que houve movimentação de águas dentro da cobertura de rocha alterada, em particular no solo de aluvião e coluvião; é interessante que mesmo no solo entre corpos de albitos, há zonas com teores mais altos em óxido de urânio (evidentemente mineralização secundária) e isso é mais um fato que evidencia a existência de fluxos hidrodinâmicos em vários sentidos, predominantemente na direção vertical.

Foi observado também que existem níveis mais argilosos dentro do solo, principalmente próximo à superfície; em alguns desses níveis, foi constatado um desequilíbrio positivo, o que está a mostrar que o urânio foi gradativamente fixado nas argilas (fenômeno de adsorção) nas sucessivas migrações das águas. É importante ressaltar, que o fenômeno de adsorção aqui é restrito e não tem expressão, quando comparado à perda de gás radônio.

Outro aspecto que deve ser mencionado e analisado, refere-se à mineralização secundária de urânio, caracterizada pela deposição de uranofano (e mais raramente torbernita) ao longo das fraturas nas zonas mais superficiais. Essa deposição, embora apresente altíssimo desequilíbrio positivo, não tem massa suficiente para afetar as conclu-

sões aqui apresentadas. Isso quer dizer que a inexpressiva presença dos minerais secundários contribui muito pouco para o desequilíbrio positivo constatado no solo, que surgiu principalmente graças ao escape do gás radônio.

Em conclusão, o maior conteúdo de urânio em relação aos seus descendentes (filhos) gama emissores na zona de intemperismo é ocasionado principalmente pela perda do gás radônio, conforme ressaltado anteriormente. Os outros diversos fenômenos aventados para explicar o desequilíbrio positivo nas rochas intemperizadas e nos solos, não têm maior expressão, quando comparados com o escape do gás radônio para a atmosfera.

Estima-se um superávit de urânio de +30% na pequena cobertura de rocha alterada existente na região. Essa estimativa se baseia em 95 amostras de duas jazidas (Rabicha e Cachoeira); o valor médio dos desequilíbrios dessas amostras é próximo de +30% e se esse número for representativo para toda a província uranífera, deverá haver na zona intemperizada cerca de 30% a mais de urânio do que o indicado pela radiometria.

Outro aspecto que deve ser levado em conta, é o fato da amostragem não ter sido rigorosamente estatística, ou seja, houve uma ligeira concentração dos pontos de amostragem nas rochas alteradas, visto que os fenômenos de desequilíbrio radioativo normalmente ocorrem nesse tipo de rocha. Em vista disso, o estado de equilíbrio radioativo, na realidade, é maior do que aquele mostrado nos gráficos NE versus EG e nos histogramas mostrados neste trabalho.

É importante ressaltar ainda, que o desequilíbrio só ocorre nas rochas intemperizadas, que ocupam um volume inexpressivo comparativamente ao gigantesco volume dos corpos uraníferos. A cobertura de rocha intemperizada e solo representa um volume bem inferior a 1% do volume total dos corpos de albitos uraníferos que se estendem a centenas de metros de profundidade.

No caso do estudo da Jazida Cachoeira, em particular, considerável número de amostras foi tomado em rochas carbonatadas, normalmente albitos com teores altos em carbonatos. Verificou-se, entretanto, que nenhuma das rochas carbonatadas apresentou desequilíbrio significativo, o que leva a supor que a presença de carbonato nos albitos não tenha sido importante no desenvolvimento dos fenômenos geradores do desequilíbrio.

Com respeito à referência feita na introdução deste trabalho sobre a reduzida quantidade de tório e de potássio nos albitos uraníferos, há que se detalhar o fato de que os albitos uraníferos de todas as jazidas estudadas apresentam o elemento tório com teores inferiores a 100 ppm e o potássio com teores em  $K_2O$  bem inferiores a 5%, valores que estão muito aquém daqueles necessários para produzir qualquer interferência na contagem gama e, portanto, toda a radiação gama registrada com os equipamentos convencionais de radiometria refletirá os descendentes gama emissores da série do urânio  $U^{238}$ .

### CONCLUSÕES

A fórmula de correção dos teores radiométricos obtidos do Perfil Gama é de aplicação geral em toda a área de Lagos Real. A fórmula é do tipo  $U = a(G)^b$ , satisfatoriamente precisa, particularmente na faixa de teores mais comuns, com um erro padrão da estimativa relativamente baixo a um nível de confiança elevado.

A dispersão quase em linha reta dos pontos (G; U) em gráfico bilogarámico, sugere que realmente a distribuição dos teores nessas jazidas é do tipo lognormal.

A influência da radiação gama dos elementos tório e potássio é realmente desprezível, de modo que o teor radiométrico representa o conteúdo em urânio, visto que esse metal está em perfeito equilíbrio radioativo com seus descendentes emissores gama.

O fato das espessuras determinadas nos registros gama serem praticamente iguais àsquelas indicadas pelas amostras de testemunho, permite verificações das exatas posições das zonas uraníferas.

A aplicação da fórmula proposta fica limitada a intervalos com espessuras superiores a 70 centímetros e teores maiores que 100 ppm. Os erros da estimativa aumentam de modo acentuado na faixa de teores entre 8.000 ppm e 30.000 ppm de  $U_3O_8$  e acima de 30.000 ppm, a fórmula simplesmente não tem resolução.

A aplicação da fórmula será mais eficaz frente a intervalos não muito heterogêneos e nas rochas sãs ou muito pouco alteradas. É recomendável que se proceda à revisão dos teores obtidos do laboratório, sempre que as discrepâncias forem consideravelmente maiores do que aquelas esperadas em função dos erros padrão da estimativa, normais para a ordem de grandeza dos teores trabalhados. Igualmente, sempre que houver uma discordância anormal das espessuras dos níveis mineralizados, será conveniente a verificação minuciosa dos dados das amostras de sondagem.

O presente trabalho procura também destacar, que em áreas desse tipo é importante não deixar de executar os registros gama nos furos de sondagem, visto a utilidade dos mesmos na determinação das espessuras mineralizadas e na estimativa dos teores de urânio.

A recomendação acima se estende às campanhas de sondagem visando outros bens minerais e o número de registros geofísicos de diferentes naturezas pode ser ampliado na medida das necessidades da pesquisa mineral que está sendo levada à frente, sempre procurando empregá-los dentro de todo o seu potencial de utilização.

Os registros geofísicos em subsuperfície podem servir para o controle dos dados das amostras de sondagem e dependendo do tipo de contexto geológico, permitem a identificação litológica, a correlação entre furos e, em alguns casos, servem até para interpretações estratigráficas e estruturais.

Não se deve prescindir da perfilagem geofísica que normalmente é uma técnica exploratória útil a um custo adicional irrelevante, quando comparada à totalidade dos gastos relacionados às operações de sondagem.

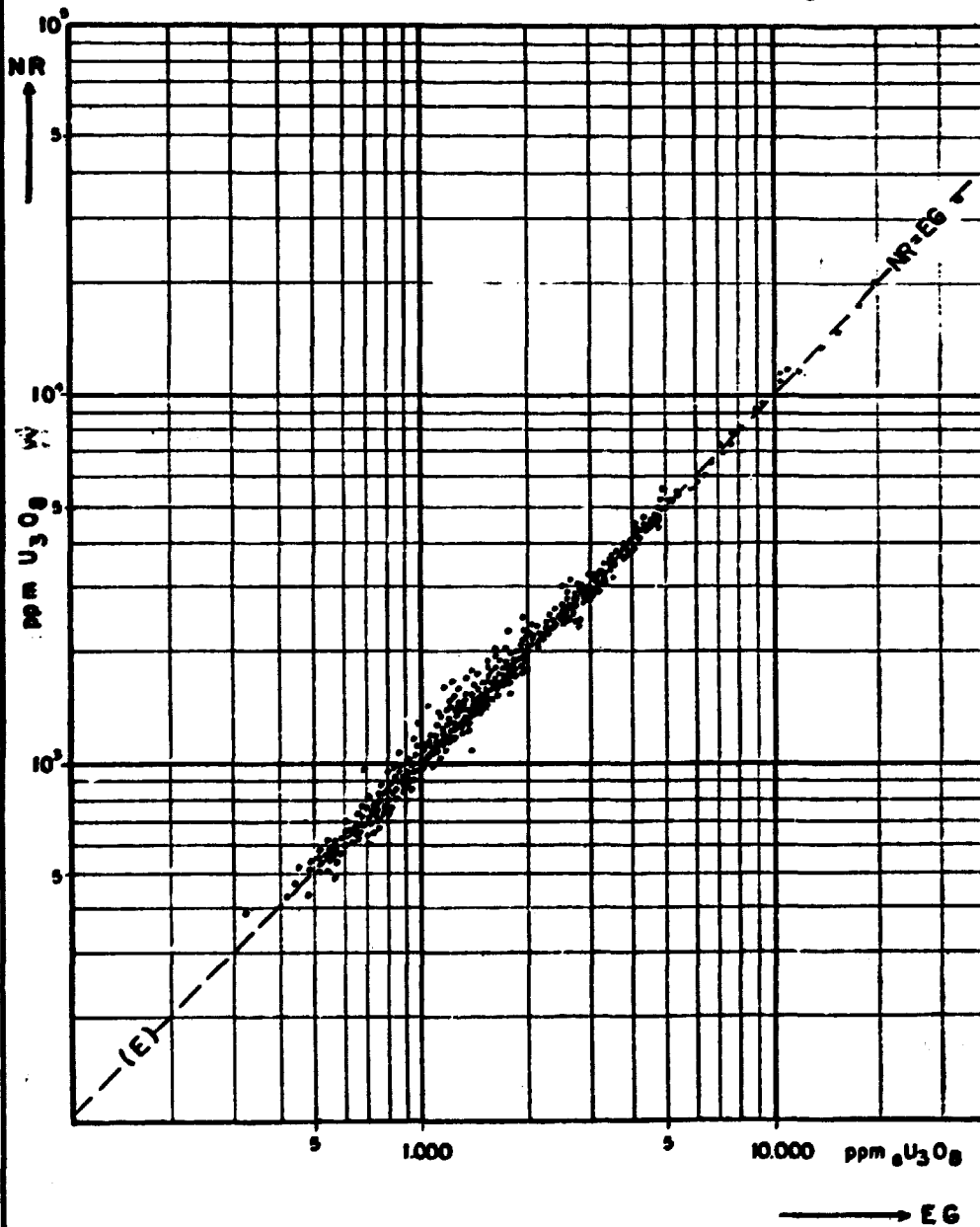
#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DODD, P.H. - 1971 - Borehole Logging Techniques for Uranium Exploration and Evaluation - Presented at North Atlantic Treaty Organization, London, October 1971.
- FUZIKAWA, K.; RAPOSO, C.; PRATES, S.P.; MATOS, E.C.; ALVES, J.V. - 1982 - Jazidas Uraníferas de Lagoa Real. In: Congr. Bras. Geol., 32, Salvador. Anais... Salvador, SBG, vol. 3.
- GEISEL SOBRINHO, E.; RAPOSO, C.; ALVES, J.V.; BRITO, W.; VASCONCELOS, T.G. - 1980 - O Distrito Uranífero de Lagoa Real, Bahia. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Camboriú, SBG, vol. 3, p. 1499 - 1512.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna - 1982 - Borehole Logging for Uranium Exploration - A Manual - Technical Reports Series Nº 212.
- JULIANO, B. - 1977 - Quelques données sur le déséquilibre radioactif (École Nationale Supérieure de Géologie) - Université de Nancy, France.
- JULIANO, B. - 1981 - Uranium Prospection - Report to the Government of Portugal - TA Report nº 1807 International Atomic Energy Agency.
- JULIANO, B. - 1981 - Perfilagem Geofísica na Exploração Mineral (Trabalho preparado para base ao curso e assessoria à DGGM de Lisboa, Portugal - Missão POR/3/002 (IAEA).
- JULIANO, B. - 1982 - Determinação da espessura mineralizada a partir do Perfil Gama - NUCLEBRÁS, Belo Horizonte - Relatório Inédito.
- JULIANO, B. - 1984 - Estudo de Desequilíbrio Radioativo (Projeto Lagoa Real/Jazida Lagoa da Rabicha) - NUCLEBRÁS, Belo Horizonte - Relatório Inédito.
- JULIANO, B. - 1984 - Estudo de Desequilíbrio Radioativo - (Projeto Lagoa Real/Jazida Cachoeira) - NUCLEBRÁS, Belo Horizonte - Relatório Inédito.
- JULIANO, B. - 1984 - Teor de urânio a partir do Perfil Gama (Projeto Lagoa Real/Jazida Cachoeira) - NUCLEBRÁS, Belo Horizonte - Relatório Inédito.

- JULIÃO, B. - 1984 - Determinação do Teor em Urânio a partir do Perfil Gama (Provincia Uranífera de Lagoa Real). NUCLEBRÁS, Belo Horizonte - Relatório Inédito.
- JULIÃO, B. - 1986 - Desenvolvimento de fórmulas para estimar os teores de urânio e de tório na área de Gandarela (MG). NUCLEBRÁS, Belo Horizonte - Relatório Inédito.
- OLIVEIRA, A.G.; FUZIKAWA, K.; MOURA, L.A.M.; RAPOSO, C. - 1983 - Provincia Uranífera de Lagoa Real - Relatório Especial. NUCLEBRÁS, Belo Horizonte, 47 p. (Inédito).
- RAPOSO, C. & MATOS, E.C. - 1982 - Distrito Uranífero de Lagoa Real - A História de um exemplo. Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador.
- RIBEIRO, C.I.; CARVALHO FILHO, C.A.; HASHIZUME, B.K. - 1984 - As jazidas de urânio de Lagoa Real - Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro.
- RICHARD, M. - 1976 - Étude de l'équilibre radioactif par la spectrométrie alpha et géochronologie par les méthodes uranium-plomb de quelques minéraux uranifères canadiens. Université de Nancy, France.
- RICHARD, P. - 1969. Étude de l'équilibre radioactif dans quelques minéraux et minerais uranifères par spectrométrie alpha. Thèse, Nancy.
- RICHARD, P. et alii - 1975 - Évaluation du taux d'équilibre radioactif de l'uranium et du radium dans le minéraux uranifères par spectrométrie gamma. Actes du 95<sup>ème</sup> Congrès National des Sociétés Savantes, Sections de Sciences, Tome I. Faculté des Sciences de Nancy.

PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL — JAZIDA DA RABICHA  
GRÁFICO DEMONSTRATIVO DO ESTADO DE EQUILÍBRIO RADIOATIVO DO URÂNIO

Fig. 1



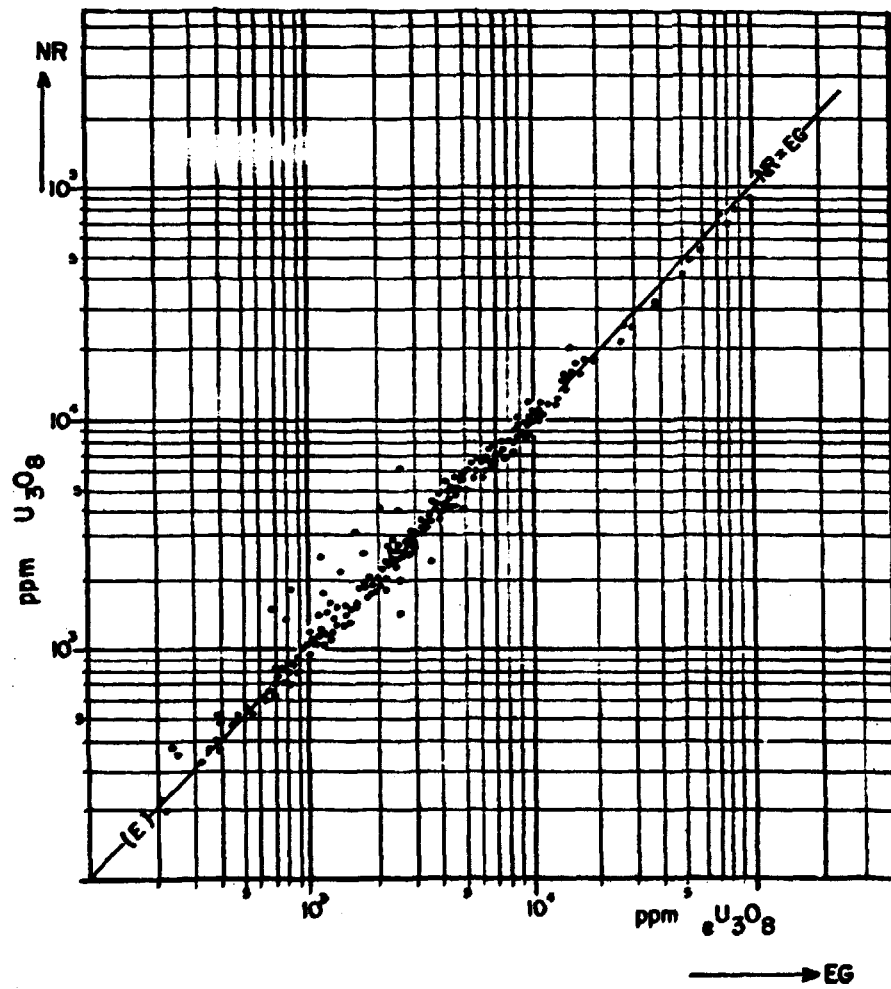
Autor: Benly-Juho

des: ealy g. gomes

PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL — JAZIDA CACHOEIRA

GRÁFICO DEMONSTRATIVO DA PREDOMINÂNCIA DO ESTADO DE EQUÍLIBRIO

Fig. 2



LEGENDA :

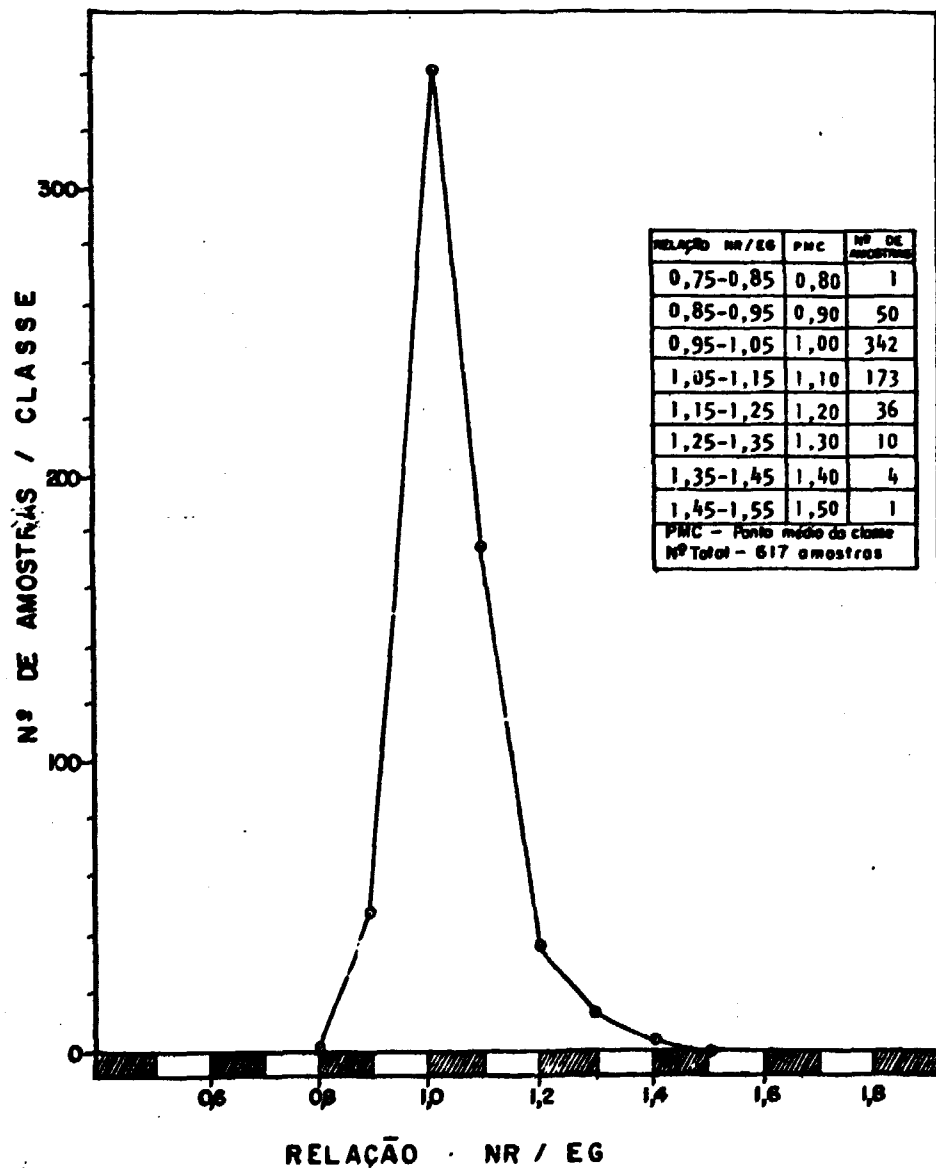
NR e EG — Teores obtidos pelos métodos de nêutrons retardados e de espectrometria gama em laboratório.

Auto: Brandy J. de S.



PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL — JAZIDA DA RABICHA  
 HISTOGRAMA DEMONSTRATIVO DO ESTADO DE EQUILÍBRIO RADIOATIVO DO URÂNIO

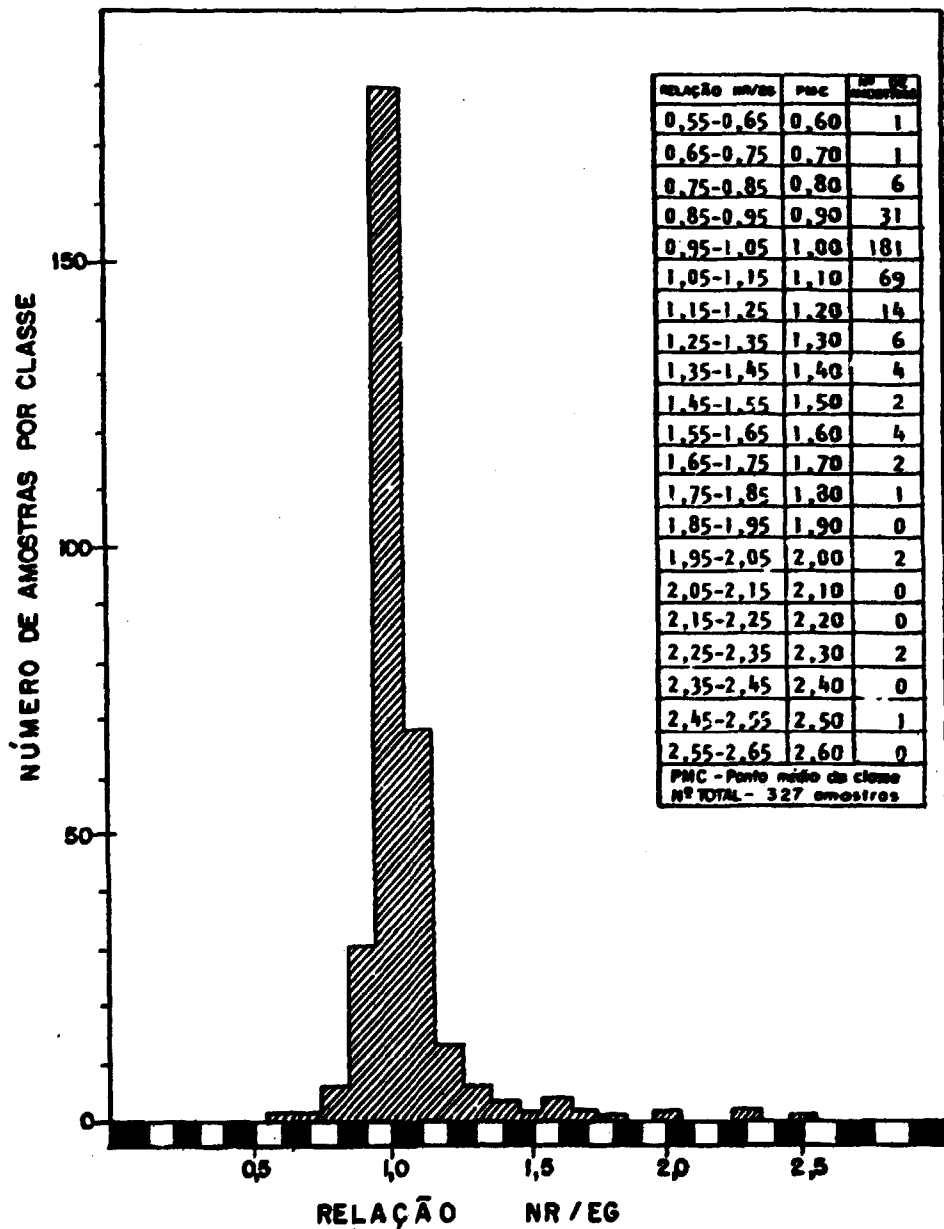
Fig. 3



Autor: Brenly Jelião

PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL - JAZIDA CACHOEIRA  
 HISTOGRAMA DEMONSTRATIVO DO ESTADO DE EQUILÍBRIO RADIOATIVO DO MINÉRIO

Fig. 4

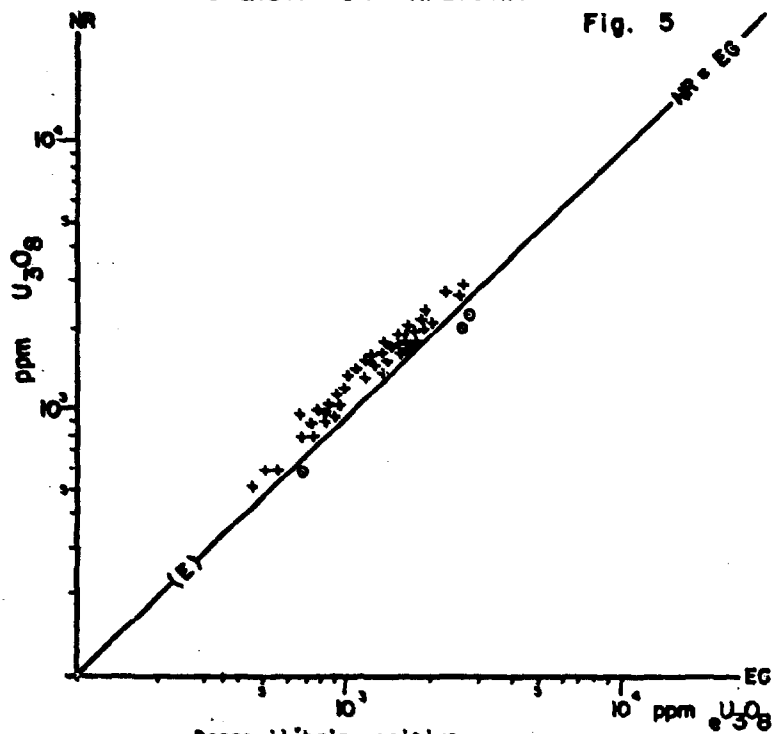


Autor: Brenly Jullio

PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL  
 GRÁFICO DAS AMOSTRAS EM Desequilíbrio

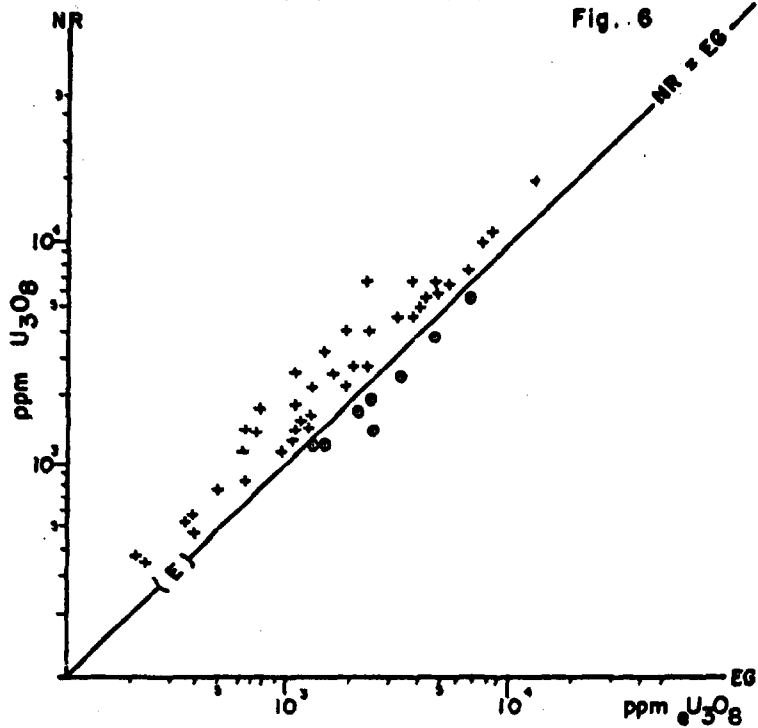
JAZIDA DA RABICHA

Fig. 5



JAZIDA CACHOEIRA

Fig. 6



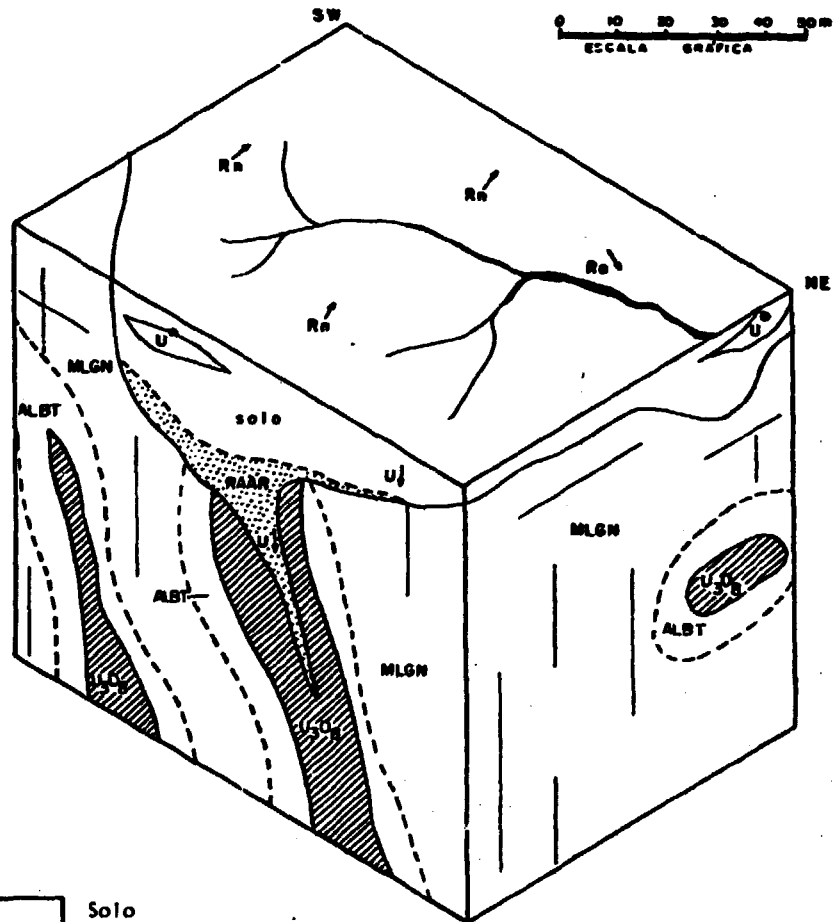
- + Desequilíbrio positivo
- Desequilíbrio negativo
- E Equilíbrio radioativo (E), onde NR = EG

Autor: Brenly Julião










Des. R. S. MENEZES

PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL — JAZIDA CACHOEIRA  
 BLOCO DIAGRAMA ESQUEMÁTICO — (PARTE DO CORPO I)

Fig. 7



0 10 20 30 40 50m  
 ESCALA GRÁFICA

-  Solo
-  MLGN Microclina gnaise
-  Albitito uranífero
-  Rocha alterada
-  Níveis mais argilosos com U adsorvido
-  Albititos
-  Escape de gás radônio para a atmosfera
-  Perda de rádio dissolvido em solução
-  Urânio concentrado em níveis mais profundos de rocha alterada

Autor: Brandy Julio