

Sociedade Brasileira de Geologia
Núcleo RS/SC
Balneário de Camboriú - SC
1980

XXXI Congresso
Brasileiro de
Geologia

Boletim nº 06

INTERPRETAÇÃO DE DADOS
GEOCRONOLÓGICOS



2a. PARTE

EVIDÊNCIAS ISOTÓPICAS PARA O CRESCIMENTO DOS CONTINENTES NO
PRÉ-CAMBRIANO*

*(In:Precambrian Plate Tectonics; Ed.A.Kröner, no prelo)

S.MOORBATH e P.N. TAYLOR
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E MINERALOGIA
UNIVERSIDADE DE OXFORD

Traduzido por: U.G.Cordani
K.Kawashita
W.Teixeira
C.C.G.Tassinari
J.M.dos Reis
O. Siga Junior

RESUMO

Dados isotópicos a respeito de Pb, Sr e Nd radiogênicos demonstram que o processo de crescimento continental por diferenciação irreversível do manto superior, no tempo geológico, predomina sobre a reciclagem e o retrabalhamento da crosta siálica mais antiga. Em conjunto com outras evidências geoquímicas e geofísicas, a idade e os dados isotópicos fornecem um quadro simplificado e dinâmico da formação, diferenciação metamórfica/geoquímica, e estabilização da crosta continental desde aproximadamente 3700 Ma.; ao mesmo tempo, contradizem as hipóteses que envolvem reciclagem e regeneração repetida de antigos protolitos continentais, recirculação maciça da crosta continental através do manto, e mistura irrestrita entre crosta continental e manto.

Dados isotópicos são geralmente diagnósticos da fonte de uma rocha magmática, mas perturbações isotópicas superimpostas, observadas em muitas rochas ígneas continentais, podem resultar de processos complexos de interação crosta-magma. Dos vários isotopos radiogênicos, o chumbo uronogênico é particularmente versátil em suas aplicações, e pode ser utilizado para reconhecer e caracterizar o sial primário derivado do manto, material siálico mais antigo retrabalhado ou parcialmente fundido, crosta siálica antiga reativada geoquimicamente, ou embasamento siálico antigo profundo.

Embora as composições isotópicas iniciais de ortognaisses calco-alcalinos pré-cambrianos geralmente indiquem a extração de seus precursores magmáticos do manto, ou da litosfera oceânica associada, seguida por diferenciação metamórfica/geoquímica penecontemporânea, granitos verdadeiros frequentemente possuem composições isotópicas iniciais que sugerem derivação por fusão parcial da crosta continental.

INTRODUÇÃO

A geoquímica dos isótopos radiogênicos (Sr^{87} , Nd^{143} , Pb^{206} , Pb^{207} e Pb^{208}) é diagnóstica da fonte magmática de um conjunto de rochas, mas não diretamente do ambiente tectônico de formação. Se os regimes de tectônica de placas predominaram ou não, no pré-Cambriano, é uma questão que pode ser resolvida apenas se for considerado um grande número de evidências a partir de diferentes disciplinas. Entretanto, os dados geocronológicos e os dados isotópicos relacionados representam importantes condicionamentos para decidir-se se um dado conjunto de rochas ígneas, ou complexo ortognáissico, tenha sido produzido por fusão de material no manto superior e/ou litosfera básica, ou por fusão da

crosta continental mais antiga.

Embora a produção de calor radiogênico no manto no fim do Arqueano (3000-2500 Ma.) tenha sido aproximadamente três vezes maior do que a de hoje, o calor radiogênico em excesso não foi removido por transferência condutiva através da crosta continental estabilizada. Dessa forma, Burke e Kidd (1978) declaram que "processos convectivos parecem necessários para dissipar esse calor, e a tectônica de placas é um familiar processo convectivo eficiente, capaz de fazer este trabalho".

Bickle (1978) considera que "a relação entre perda de calor, proporção de criação de placas e velocidade de transporte de calor para a base da litosfera, sugerem que uma quantidade significativa de perda de calor no Arqueano deve ter ocorrido por processos de criação de placas e subducção. Os processos tectônicos arqueanos podem ter envolvido produção muito mais rápida de placas, pouco menos espessas do que as de hoje em dia". De modo similar, England (1979) concluiu que "os gradientes geotérmicos mais baixos permitidos pelos dados de pressão e temperatura seriam consistentes com a idéia de uma tectônica arqueana, em que o regime termal nos continentes fosse similar ao do presente e grande parte do calor adicional teria sido perdido do interior da Terra através de uma velocidade maior de criação de litosfera oceânica. Isto é clara e diretamente relevante à questão muito debatida da crosta sílica continental ter aumentado ou não, em massa, no tempo geológico.

Atualmente reconhece-se que os ortognaisses calco-alcalinos, que constituem predominantemente as áreas de escudo pré-cambrianas, são os elementos de constituição fundamentais da crosta continental e são derivados do manto superior ou de materiais crustais que possuem tempos curtos de residência na crosta. Este assunto tem sido revisado extensivamente, nos últimos tempos, (por exemplo Windley e Smith, 1976; Moorbath, 1977, 1978a; Brown, 1977; Brown e Hennessy, 1978; O'Nions e Pankhurst, 1978; Barker, 1979; Glikson, 1979; Tarney et al., 1979). Além disso, parâmetros tais como a espessura da crosta continental pré-cambriana, a magnitude das geotermas continentais arqueanas, e a distribuição característica, nos continentes, dos elementos radiogênicos produtores de calor (isto é, decréscimo exponencial com a profundidade), foram todos muito similares nos tempos arqueanos em comparação com o presente. (por exemplo Bickle, 1978; Burke e Kidd, 1978; Brown e Hennessy, 1978; Tarney e Windley, 1978; Davies, 1979; England, 1979; Wells, 1979). Todas essas considerações estão em plena concordância com as limitações impostas pelas evidências geoquímicas, geocronológicas, e isotópicas.

Dados isotópicos em rochas ígneas calco-alcalinas, de todas as idades, incluindo ortognaisses pré-cambrianos, sugerem que a diferenciação química irreversível do manto, iniciando-se pelo menos há 3700 Ma., teria produzido nova crosta sílica continental durante diversos episódios relativamente curtos (cerca de 100-300 Ma.) que, em qualquer região determinada, foram comumente separados no tempo, e podem ter sido de extensão global. Durante cada um desses assim denominados "super-eventos de acreção-diferenciação continental (SADC; ver Moorbath 1975a, 1975b, 1977, 1978a), sial juvenil derivado do manto e/ou da litosfera básica sofreu completa diferenciação ígnea, metamórfica e geoquímica, praticamente contemporâneas, para produzir crosta continental espessa, estável e permanente possuindo estratificação geoquímica gradativa. Tal crosta continental exhibe agrupamentos coerentes de idades isotópicas, inerentes à formação de rochas, bem como composições isotópicas iniciais de Sr, Pb, Nd típicas do manto, para qualquer dos constituintes principais. Os dados isotópicos sugerem que, na maioria dos SADC, e especial durante aqueles do pré-Cambriano antigo, crescimento continental predominou grandemente sobre retrabalhamento da crosta sílica mais antiga.

Não obstante retrabalhamento de crosta siálica muito mais antiga ocorra de fato em muitos tipos de ambiente tectônico, certamente torna-se mais comum com o crescimento progressivo e fragmentação da crosta continental através do tempo geológico, e com a migração independente dos fragmentos separados. O retrabalhamento de crosta continental mais antiga é usualmente distinguível dos regimes tipo SADC em qualquer terreno, a partir de estudos detalhados sobre idade e composição isotópica. Em base puramente petrológica, os granitos verdadeiros parecem ser a expressão magmática da fusão parcial de crosta siálica, mais do que qualquer outro membro da suite calco-alcalina. Além disso, granitos verdadeiros (de qualquer idade geológica) tendem a possuir razões iniciais Sr^{87}/Sr^{86} mais elevadas e mais variáveis do que rochas calco-alcalinas contemporâneas, uma expressão da proporção relativamente maior de envolvimento de crosta continental em sua gênese. O grau de divergência isotópica de um granito determinado em relação a uma rocha basáltica ou calco-alcalina contemporânea e derivada do manto, é função do grau de envolvimento crustal, da natureza geoquímica da crosta, e da diferença em idade entre o granito e o seu protolito crustal. Por exemplo, quando a diferença em idade é pequena, a composição isotópica inicial dos granitos derivados da crosta pode aproximar-se muito dos valores das rochas contemporâneas derivadas do manto. Nos casos em que magma granítico é formado por fracionamento direto de magmas basálticos ou intermediários, derivados do manto, as composições isotópicas iniciais podem ser idênticas às do manto contemporâneo, dentro do erro analítico. Existem muitas possibilidades, do que decorre que os dados isotópicos em cada rocha granítica devem ser interpretados cuidadosamente, por seus próprios méritos. Granitos verdadeiros são petrogeneticamente muito mais variados do que a maioria das outras rochas ígneas, visto que seus magmas parentais podem ser derivados do manto, da litosfera oceânica, da crosta siálica continental, ou por qualquer combinação destas fontes. Em contraste, os dados petrogenéticos (e isotópicos) mostram que os tonalitos que constituem os continentes, e seus equivalentes conagêneos plutônicos e vulcânicos calco-alcalinos, possuem uma variação em material parental mais restrita, no manto superior ou na litosfera oceânica (veja por exemplo Ringwood, 1974; Stern et al., 1975; Thorpe et al., 1976; Anderson et al., 1978; Hanson, 1978).

A evidência isotópica e geoquímica indica que as componentes vulcânicas dos complicados conjuntos de rochas verdes arqueanas vulcano-sedimentares ("supra crustais") derivaram-se largamente do manto (para revisão, ver O'Nions e Pankhurst, 1978). O termo unificado "greenstone belt", impediu um melhor entendimento destes componentes mais comuns da crosta continental arqueana. Tais cinturões antigos supracrustais foram formados em larga variedade de ambientes tectônicos, incluindo deposições em a) crosta siálica continental mais antiga, b) crosta básica ("proto-oceânica?") longe da influência da crosta continental, c) crosta básica (proto-oceânica?) próxima de margem continental ou de bacia de "back arc", e portanto acessível aos detritos continentais.

Dessa forma, é evidente que existem "greenstone belts" e "greenstone belts", e poderia ser aplicado para explicá-los grande número de hipóteses tectônicas. Um modelo de bacia marginal parece ser particularmente apropriado para alguns cinturões de rochas verdes sobre, ou perto de crosta continental (Tarney et al., 1976). Algumas das mais antigas associações supracrustais conhecidas podem possuir crosta continental pré-existente em sua região particular. Um exemplo deste tipo pode ser fornecido pelas rochas supracrustais "Isua" na Groenlândia ocidental com cerca de 3800 Ma. (Moorbath et al., 1973; Allart, 1976; Bridgwater et al., 1976; Michard-Vitrac et al., 1977; Hamilton et al., 1978), depositadas em ambientes de águas rasas, em que predominam lavas basálticas e riolíticas, clásticos próximos à costa, sedimentos vulcanogênicos, bem como sedimentos químicos.

Sequências antigas supracrustais variam desde virtualmente sem

metamorfismo até graus metamórficos médios a elevados. No último caso elas são frequentemente encontradas como enclaves maciços ou inclusões separadas nos ortognaisses calco-alcalinos envolventes. Apenas pouco dos terrenos gnáissicos maiores (principais) são isentos de tais xenólitos de ascendência supracrustal. Os magmas, a partir dos quais os gnáisses cristalizaram, invadiram claramente e engolfaram as rochas supracrustais durante eventos maiores de acreção continental, com toda probabilidade pelo processo de "over accretion" imaginado por Wells (1979, 1980).

Todos estes fatores devem ser levados em conta ao se interpretar as complexas relações geocronológicas e isotópicas que foram observadas no interior dos cinturões de rochas verdes, e entre estes e os terrenos orto-gnáissicos vizinhos. Nos casos mais simples, o estreito agrupamento de idades e dados isotópicos num dado terreno "gneiss-greenstone arqueano" demonstram que ambos os tipos de rocha podem resultar de um único SADC, estendendo-se por um período de até 100-200 Ma. (por exemplo Arth e Hanson, 1975; Hawkesworth et al., 1975; Jahn e Murthy, 1975; Roddick et al., 1976).

Em seguida, efetuaremos um sumário de algumas aplicações recentes de estudos isotópicos, em particular relacionados com evolução continental pré-cambriana. Descrições dos princípios básicos dos métodos isotópicos podem ser encontradas em: Faure e Powell (1972), Faure (1977), O'Nions et al., (1979) e Köppel e Grünenfelder (1979).

INTERAÇÃO MAGMA-CROSTA, CONTAMINAÇÃO SELETIVA E MISTURA ISOTÓPICA

Existe um fator complicante na interpretação de dados isotópicos que deve ser levado em conta ao considerar rochas magmáticas derivadas do manto, intrusivas (?) na crosta siânica continental mais antiga, ou extrusivas sobre ela. Rochas ígneas continentais frequentemente exibem sistemáticas isotópicas de Sr, Pb, e Nd, com complexidade muito maior que as de rochas ígneas oceânicas. Numerosas interpretações conflitantes foram fornecidas para esta observação: autores diferentes atribuem o problema à heterogeneidade isotópica do manto superior, ou da crosta continental, ou da litosfera sub-continental ("tectosfera", Jordan, 78), ou mesmo a uma combinação destas heterogeneidades (por exemplo Brooks et al., 1976a; Faure, 1977; Pankhurst, 1977; Carter et al., 1978a).

Em nossa opinião, as sistemáticas nas rochas ígneas continentais isotopicamente perturbadas são mais frequentemente atribuíveis à interação crosta/magma, resultando na mistura de elementos incompatíveis (incluindo aqueles com isótopos radiogênicos) derivados do magma proveniente do manto e da crosta continental circundante. Mistura completa de magma e material crustal (incluindo assimilação global de crosta pelo magma) é frequentemente descartada a partir dos dados petrológicos e geoquímicos de elementos maiores e traços, de tal forma que a contaminação seletiva e processos de mistura envolvendo apenas elementos traço incompatíveis, podem ser postulados (por exemplo Moor bath e Welke, 1969a; Carter et al., 1978; Briquet e Lancelot, 1979; Moor bath e Thompson, 1980). O mecanismo provavelmente envolve a mistura de magmas provenientes do manto com uma fase fluída contendo elementos incompatíveis derivados de minerais hidratados da rocha encaixante, nas proximidades dos condutos e das câmaras magmáticas. Desde que haja calor suficiente o processo pode progredir e em princípio levar à fusão parcial da rocha encaixante (Patchett, 1980; Wells, 1979, 1980). Entretanto, este processo provavelmente não ocorre se a rocha encaixante da câmara magmática é completamente anidra (e permanece como tal), refratária e geoquimicamente empobrecida, tal como pode ser esperado no caso de alguns gnáisses de fácies granulito.

A magnitude da perturbação isotópica em qualquer rocha ígnea continental parece depender fortemente da espessura, idade e geoquímica da crosta que foi invadida ou atravessada. Independentemente do mecanismo real da interação crosta-magma, o Sr radiogênico e os isótopos de Nd, e particularmente de Pb podem atuar como traçadores muito sensíveis para tal processo. Por outro lado os isótopos de Pb podem também revelar uma idade aproximada para as rochas que forneceram a componente de Pb continental, mesmo quando não se encontram expostas na superfície. Os princípios básicos deste enfoque já são reconhecidos há muito tempo aplicados às galenas (veja Russell e Farquhar, 1960). É evidente que a sistemática isotópica de Pb nas rochas ígneas silicáticas comuns pode ser interpretada de modo similar. Em sua maioria, tais estudos com isótopos radiogênicos foram efetuados em rochas ígneas continentais fanerozóicas e recentes, que foram introduzidas, ou que atravessaram, embasamentos continentais antigos (por exemplo Moor bath e Welke, 1969a; Zartman, 1974; Armstrong et al., 1977; Leeman e Dasch, 1978; Lipman et al., 1978). A combinação observada comumente de Sr radiogênico e Pb não radiogênico é testemunho da interação do magma com a crosta continental antiga que manteve razões Rb/Sr elevadas e U/Pb baixas desde a sua formação. Tal material crustal pode ser provavelmente identificado de modo genérico como um gnaiss de fácies anfíbolito.

Disto decorre que as análises dos isótopos radiogênicos de rochas ígneas continentais de qualquer tipo podem às vezes serem utilizadas para detectar embasamento continental antigo em profundidade, mesmo quando este não se encontra exposto na superfície (por exemplo Moor bath e Welke, 1969b; Zartman, 1969; Blaxland et al., 1979). Reciprocamente, a ausência de crosta continental em áreas oceânicas é claramente demonstrável a partir de medidas isotópicas, tendo em vista que o comportamento coerente dos dados dos isótopos radiogênicos revelou-se uma ferramenta muito poderosa para o estudo espacial e temporal das heterogeneidades geoquímicas no manto superior (por exemplo Sun e Hanson, 1975; Brooks et al., 1976b; Hofmann e Hart, 1978; O'Nions et al., 1978). Acreditamos que os efeitos isotópicos das interações crosta/magma resultantes de contaminação seletiva e dos processos de mistura dos elementos traço, são uma ferramenta útil para a detecção, caracterização e "mapeamento" sub-superficial de crosta continental antiga em profundidade, bem como para estudar a extensão e o crescimento de tal crosta. Mais tarde, mencionaremos a aplicação dos isótopos de Pb para determinar a extensão em sub-superfície da crosta continental do Arqueano precoce (cerca de 3700 Ma.), abaixo das rochas do Arqueano tardio (cerca 3000 - 2800 Ma.) na Groenlândia ocidental.

ISÓTOPOS DO ESTRÔNCIO

Muitos dos maiores terrenos pré-cambrianos de ortognaisses calcálicos produzem boas linhas de regressão pelo método Rb-Sr em rocha total em áreas de centenas, até milhares de Km². Geralmente, quanto menor e mais uniforme, do ponto de vista petrológico, for a unidade gnáissica amostrada, melhor será a aproximação para uma isócrona de boa qualidade. As razões iniciais Sr⁸⁷/Sr⁸⁶ (abreviadas subsequentemente para R.I.), para a maioria dos gnaisses, ou coincidem ou situam-se muito levemente acima dos valores do manto superior contemporâneo, como as deduzidas dos modelos plausíveis de evolução do manto superior (por exemplo Faure e Powell, 1972; Hart e Brooks, 1977; Hurst, 1978; Peterman, 1979). Não podemos excluir um pequeno grau de heterogeneidade do manto nos tempos pré-cambrianos como uma das causas dessa variação isotópica do Sr. Entretanto, as R.I.s medidas em ortognaisses calcálicos de terrenos pré-cambrianos, de alto grau metamórfico, não são necessariamente idênticas dentro do erro analítico, com suas regiões-fonte do manto porque pode ter transcorrido um intervalo de tempo significativo entre a formação do magma e o fechamento final dos

sistemas dos ortognaisses, para o método Rb/Sr em RT (Moorbath, 1978b).

Gnaisses arqueanos e proterozóicos comumente fornecem RIs no intervalo 0,700 a 0,703 (por exemplo Moorbath, 1975a, 1977; O'Nions e Pankhurst, 1978; Peterman, 1979). Além disso, existem boas evidências de medidas em vulcânicas máficas inalteradas, com 2700 Ma. de idade, que em pelo menos um caso, o magma no manto superior teve relação Sr^{87}/Sr^{86} naquela época próxima a 0,7011 (Hart e Brooks, 1977). É de concordância geral que as RIs baixas dos ortognaisses calco-alcálicos pré-cambrianos impossibilitam a sua formação por retrabalhamento de rochas significativamente mais velhas, com razões Rb/Sr típicas da crosta superior, e em tais casos, as isócronas Rb/Sr em RT datam grosseiramente eventos de acreção crustal.

Em nossa opinião, a razão principal para as diferenças observadas entre razões Sr^{87}/Sr^{86} da crosta juvenil e manto penecontemporâneo resulta dos intervalos de tempo, geocronologicamente curtos mas finitos, ocupados pelos processos de gênese e acreção crustal de sial juvenil, com diferenciação petrológica, geoquímica e metamórfica concomitante. O sial calco-alcálico juvenil claramente possui razões Rb/Sr mais elevadas (tipicamente por um fator de aproximadamente 10) do que a sua região fonte básica ou ultrabásica. Além disso, qualquer processo plausível, em diversos estágios de acreção crustal e diferenciação interna, tal como o proposto por Wells (1979-1980), deve durar pelo menos diversas dezenas ou mais provavelmente 100 a 200 Ma. A idade real registrada por uma isócrona Rb/Sr em RT representa o tempo em que as rochas tornaram-se sistema fechado para migração de Rb e Sr na escala da amostragem dos espécimens analisados em RT. Dispersão significativa das R.I.s em diferentes unidades de ortognaisses que pertencem a um SADC principal é atribuível possivelmente a:

- a) heterogeneidade dos isótopos de Sr do manto superior;
- b) redistribuição de Sr em unidades intrusivas precoces como resultado do aquecimento superimposto de intrusões posteriores;
- c) contaminação seletiva de unidades intrusivas tardias pelas mais antigas, com mistura isotópica resultante;
- d) metamorfismo progressivo e diferenciação geoquímica associada no segmento crustal recentemente acrescido como um todo, causando perda de Rb na crosta inferior (decréscimo das relações Rb/Sr) e enriquecimento de Rb (aumento das relações Rb/Sr) na crosta superior, levando ao estabelecimento e ao ulterior congelamento de um gradiente Rb/Sr na crosta "amadurecida".

Dessa forma, é fácil verificar como variações pequenas, mas significativas na RI., podem ser estabelecidas nos componentes crustais recém-formados durante um SADC complexo em estágios múltiplos e estendendo-se tipicamente durante um período de 100-200 Ma.. Na verdade, existe uma gama de possibilidades quase infinita, mas a tendência global dirige-se para uma evolução do Sr^{87}/Sr^{86} mais rápida e variável na crosta recém formada em relação ao manto contemporâneo, enquanto que a possibilidade de qualquer unidade crustal individual preservar o valor Sr^{87}/Sr^{86} similar ao do manto contemporâneo é relativamente pequena. Pelo exposto acima, o valor mais baixo da RI num conjunto de ortognaisses mais ou menos contemporâneos é aquele que se encontra mais próximo do valor Sr^{87}/Sr^{86} da região fonte no manto contemporâneo.

Deste modo, as variações observadas nas RIs de até 0,001 - 0,002 em diferentes componentes crustais formados num único SADC podem ser explicadas por processos complexos, de curta duração, e através de estágios múltiplos tais como os descritos acima, embora com um aumento na RI de aproximadamente 0,001 - 0,002 em relação ao valor no manto superior contemporâneo. Entretanto, a possibilidade do envolvimento limitado de crosta continental muito mais antiga não pode ser rigorosamente excluída.

Ortognaisses calco-alcálicos de fácies anfíbolito possuem razões Rb/Sr tipicamente no intervalo 0,2-0,4, e em média cerca de 10 vezes maior do que o manto superior, apresentando velocidades de crescimento na relação Sr^{87}/Sr^{86} proporcionalmente aumentadas. Em contraste, a razão Rb/Sr média da crosta continental profunda de fácies granulito (empobrecida de Rb) apresenta-se usualmente menor do que 0,04, refletindo o fenômeno largamente relatado da perda de Rb nos gnaisses de fácies granulito considerados por muitos como os componentes essenciais da crosta continental inferior (por exemplo Heier, 1973; Tarney e Windley, 1977). Daí decorre que as razões Sr^{87}/Sr^{86} média e Rb/Sr baixa da crosta continental de fácies granulito, encontram-se próximas do valor do manto superior contemporâneo, desde que as rochas de fácies granulito datem do tempo SADC no qual seus protólitos foram formados. Desta forma, as razões Sr^{87}/Sr^{86} encontradas em muitos dos granulitos Lewisianos do Arqueano tardio (2900-2700 Ma.) na Escócia nor-ocidental situam-se no intervalo 0,7021-0,7034 (Rb/Sr = 0,003-0,010, Chapman, 78). Se estes gnaisses fossem fundidos parcialmente hoje os magmas resultantes teriam R.I.s no mesmo intervalo encontrado para as rochas derivadas do manto no presente. Em tal caso, os isótopos do Sr não podem distinguir entre uma origem do manto superior ou da crosta profunda para uma determinada rocha ígnea, embora possa ser improvável em bases petrológica e geoquímica explicar a produção de enormes quantidades de magma calco-alcálico juvenil, a partir da crosta continental profunda, empobrecida, seca e geoquimicamente estéril. A utilização de dados de Pb e Nd se faz necessária para resolver este tipo de problema.

Não obstante, as complicações interpretativas acima expostas, as figuras 1A e 1B apresentam diagramas de evolução Sr^{87}/Sr^{86} normais para grupos selecionados de ortognaisses calco-alcálicos pré-cambrianos de fácies anfíbolito, respectivamente da Groenlândia ocidental e da Rodésia. A linha de crescimento de manto é aquela recomendada por Peterman (1979), embora a sua forma exata ou posicionamento não seja crucial para as aplicações aqui discutidas. As linhas de crescimento crustal são baseadas nas relações Rb/Sr médias para unidades gnaissicas individuais. De acordo com os métodos corriqueiros de interpretação dos isótopos de Sr (por exemplo Faure e Hurley, 1963; Faure e Powell, 1972; Moorbath 1975a, 1975b), os gnaisses incluídos nas figuras 1A e 1B (da mesma forma que muitos gnaisses similares na literatura publicada) representam adições crustais juvenis nas épocas indicadas e não podem ter sido derivados por retrabalhamento ou fusão parcial de crosta muito mais antiga, com razão Rb/Sr elevada.

As figuras 1A e 1B mostram também linhas de crescimento de dois granitos arqueanos (sensu stricto), denominados de granito de Qôrquut com idade de 2530 ± 30 Ma. da Groenlândia ocidental (Moorbath e Taylor, em preparação), e o granito Mont D'Or da Rodésia (Moorbath et al., 1976) com 3340 ± 60 Ma.. Estes granitos possuem RI elevada de $0,7081 \pm 0,0008$ e $0,711 \pm 0,001$ respectivamente, e provavelmente representam fusões parciais de rochas do embasamento continental mais antigo de cerca de 1100 Ma. e de 200 Ma. nas suas áreas respectivas. Neste aspecto os isótopos de Pb no granito de Qôrquut são importantes e serão discutidos mais tarde. Para comparação genérica, a fig. 1A mostra também a R.I. média de 0,7040 de 86 amostras de vulcânicas calco-alcálicas recentes do México, Costa Rica, Equador, e Chile central (Francis et al., 1977; Moorbath et al., 1978; Thorpe et al., 1978; Hawkesworth et al., 1979c, Dérvelle e Moorbath, dados inéditos). Nestas áreas com espessura de crosta normal (cerca de 30 km), onde os efeitos de contaminação isotópica crustal são mínimos, o intervalo relativamente pequeno das R.I.s de 0,7036 - 0,7044 é virtualmente idêntico ao das vulcânicas calco-alcálicas de regiões oceânicas, e claramente próximo do intervalo de valores para o manto moderno. De acordo com Briquieu e Lancelot (1979), consideramos os valores mais elevados das RIs, principalmente no intervalo 0,705 - 0,708 das vulcânicas calco-alcálicas do Peru meri

Figura 1a - Diagrama da evolução isotópica do estrôncio para Groenlândia ocidental: A) Gnaisses Amítsoq (Moorbath et al 1972) ; BC, Gnaisses Nûk e seus equivalentes (Moorbath e Pankhust, 1976); DE, Gnaisses Ketilídianos da Groenlândia meridional (Van Breemen et al., 1974); F. Granito Qôqut (Moorbath e Taylor, em preparação). A inserção no canto superior esquerdo, mostra a estrutura fina das razões iniciais Sr^{87} / Sr^{86} dos Gnaisses Nûk e equivalentes (Moorbath e Pankhust, 1976). A linha evolutiva do manto (0,6990-0,7039) é aquela recomendada por Peterman (1979). O ponto G é a média (0,7040) de numerosas vulcânicas calco-alcalinas, isotopicamente não contaminadas dos Andes da América Central e do Sul (para referências e pormenores adicionais, ver texto). Constante de desintegração $\lambda_{87} = 1,42 \times 10^{-11} \text{ ano}^{-1}$.

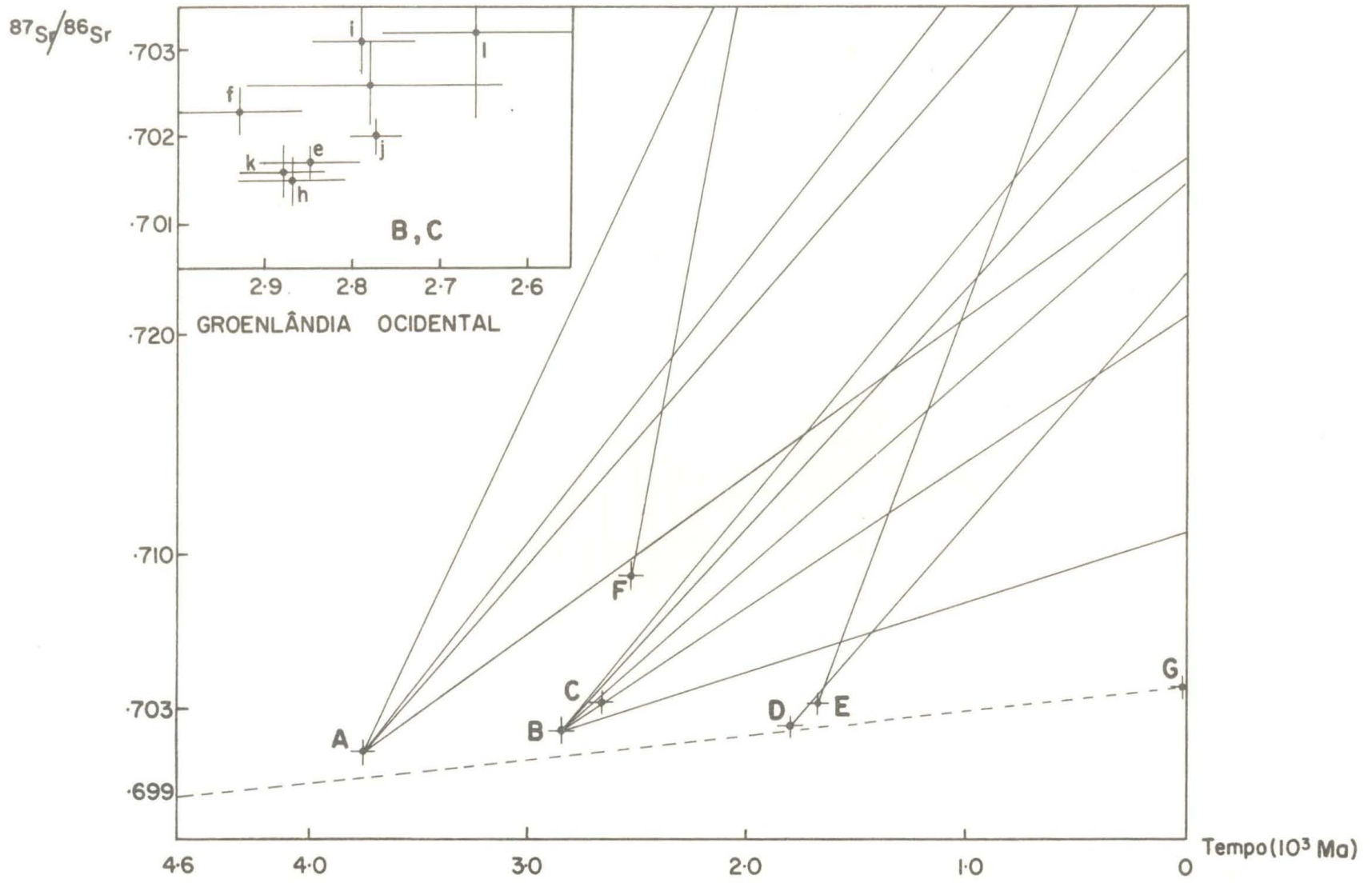


FIGURA IA

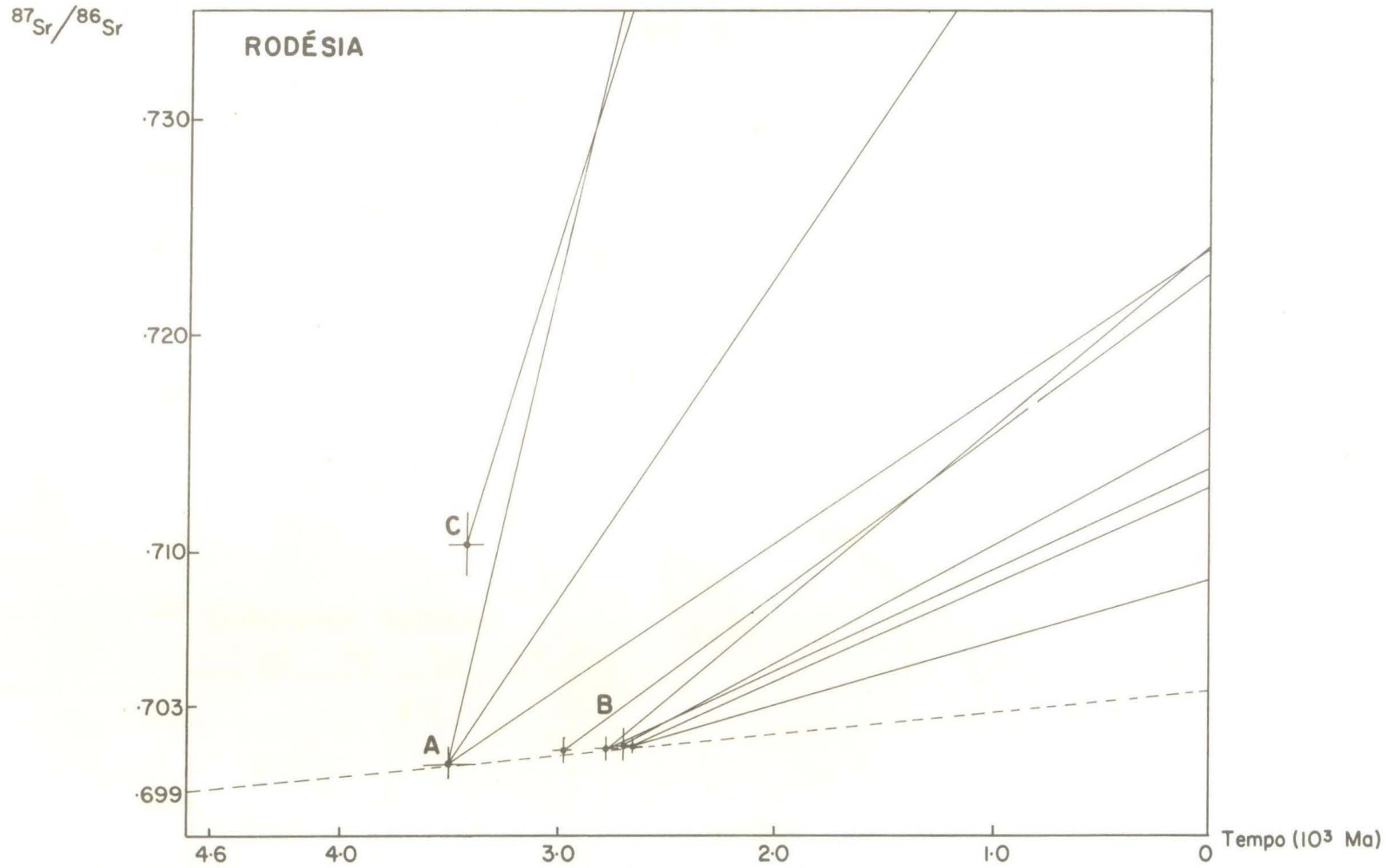


Figura 1b - Diagrama da evolução isotópica do estrôncio para a Rodésia: A. Gnaisses do Arqueano precoce (Hickman, 1974; Hawkeswort et al., 1975; Moorbath et al 1977); B. Gnaisses, Granitos e vulcânicas de cinturões verdes do Arqueano tardio (Hawkeswort et al 1975; Moorbath et al 1979 a); C. Granito Mont d'or (Moorbath et al 1976).

dional e norte do Chile (James et al., 1976; Francis et al., 1977; Klerkx et al., 1977), como devidos à contaminação crustal seletiva de magmas calco-alcalinos ascendentes por meio de elementos incompatíveis derivados da crosta continental subjacente, antiga e espessa (até 70 km), nestas regiões (Cobbing et al., 1977; Dalmayrac et al., 1977; Halpern, 1978., Shackleton et al., 1979; Thorpe e Francis, 1979). Neste sentido, Windley e Smith (1976) consideram os batolitos calco-alcalinos dos Andes - presumivelmente conectados geneticamente no "sensu lato" com as vulcânicas calco-alcalinas sobrejacentes e circundantes - como os análogos de nível elevado e geologicamente mais jovens dos complexos antigos de gnaisses de alto grau.

ISÓTOPOS DO CHUMBO

Reconhecimento dos Super Eventos (SADC)

Muitos dos maiores terrenos pré-cambrianos do ortognaisses calco-alcalinos produzem excelentes isócronas Pb^{207}/Pb^{206} em RT, que frequentemente concordam dentro do erro analítico com as idades Rb-Sr em RT correspondentes, embora um número muito menor de dados Pb/Pb tenha sido publicado. A simplicidade da sistemática isotópica do Pb/Pb em tais casos sugere a derivação dos precursores magmáticos de uma região fonte com uma razão U^{238}/Pb^{204} relativamente uniforme, próxima de uma evolução num único estágio, desde a época da formação da Terra até a idade isocrônica medida. As razões U^{238}/Pb^{204} (valores u_1) calculadas para as fontes dos magmas parentais de muitos ortognaisses arqueanos situam-se no intervalo entre 7,5 até 8,0 (parâmetros do modelo similares aos usados por Oversby, 1974). Este intervalo é considerado característico do manto superior, de forma que supõe-se que gnaisses com valores u_1 indicados neste intervalo possuam sua origem no manto superior ou na litosfera básica (ver tabela 1).

Na Fig.2, os dados Pb/Pb para os gnaisses Amitsoq com idade de 3700 Ma. e para os gnaisses da Groenlândia ocidental (fora da área de Godthaab) com idade de cerca de 2900 Ma., são plotados em relação a uma curva de crescimento de estágio único. Ambas as isócronas Pb^{207}/Pb^{206} indicam o valor de u_1 necessário para um "primeiro estágio", de 7,5 para a região fonte de seu magma parental. Assim, a razão U^{238}/Pb^{204} da região fonte, no manto, dos precursores magmáticos dos gnaisses, aparentemente permaneceu constante durante todo o Arqueano nesta região. Muitos outros gnaisses arqueanos de regiões diferentes revelam valores de u_1 similares para sua região fonte, como pode ser visto na tabela 1. Cada isócrona Pb/Pb "grosso modo" data um SADC, que inclui desde a extração do material parental do manto superior até a estabilização final de um segmento novo de crosta continental por diferenciação metamórfica e geoquímica durante um intervalo de tempo que não excede 100-200 Ma.. Tipicamente, grande parte dos gnaisses de fácies granulito e anfibolito alto situa-se muito próxima da interceptação inferior de sua isócrona com a curva apropriada de crescimento do manto segundo estágio único (fig.2), demonstrando o fenômeno característico de perda de Urânio durante o metamorfismo de alto grau que se segue imediatamente à cristalização dos protolitos ígneos.

Em contraste à situação do Rb e do Sr discutida anteriormente, a diferenciação geoquímica interna da crosta silícea produz crosta continental inferior na qual as relações U/Pb são muito mais baixas do que no manto superior, de forma que a evolução isotópica do Pb radiogênico na crosta continental inferior é severamente retardada em relação à do manto. As análises isotópicas do Pb, em conjunto com os dados relativos às concentrações de U e Pb, mostram que as relações U/Pb na crosta continental profunda são 5 a 10 vezes mais baixas do que no manto superior. Esta diferença típica entre a crosta continental inferior e o manto superior persistiu claramente durante a histó-

TABELA 1

TABELA 1: DADOS ISOCRÔNICOS Pb/Pb PARA ORTOGNAISSES CALCO-ALCALINOS ARQUEANOS¹

Região	Idade, Ma	²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb da fonte (μ_1)	Nº de Pontos	MSWD	Referências
<u>Groenlândia Ocidental</u>					
Gneisses Amîtsoq, área de Godthaab	3770 \pm 160	7.62	27	21	Black et al., 1971, Oxford dados inéditos
Gneisses Amîtsoq, área de Isua	3700 \pm 80	7.58	7	4.8	Moorbath et al., 1975b
Gneisses Nûk e equivalentes:					
Granulitos Nordland-Sukkertoppen	3000 \pm 80	7.60	19	2.3	Taylor et al., em preparação
Sermilikfjord	3000 \pm 80	7.48	11	1.5	Taylor et al., em preparação
Fiskenaasset	2820 \pm 70	7.48	9	1.2	Taylor et al., em preparação
<u>Groenlândia Oriental</u>					
Área de Kangerdlussuaq	2980 \pm 60	8.08	7	5.6	Leeman et al., 1976
Área de Kangerdlussuatsiaq	2750 \pm 90	7.77	7	1.5	Bridgwater et al., 1978
<u>Labrador</u>					
Gneisses Uivak	3560 \pm 80	7.48	11	6.9	Baadsgaard et al., 1979; Bridgwater e Taylor, dados inéditos
<u>Norte da Noruega (Lofoten-Vesterålen)</u>					
Northwest Hinnoy, gneisses do facies anfíbolito	2690 \pm 60	7.91	22	2.3	Griffin et al., 1978
<u>Noroeste da Escócia</u>					
Southern Outer Hebrides, gneisses do facies anfíbolito	2600 \pm 80	7.26	13	5.7	Moorbath et al., 1975a
Granulites Scourian, área de Scourie	2680 \pm 60	7.66	20	3.0	Chapman e Moorbath, 1977
<u>Craton Karnataka, Índia meridional</u>					
Área de Chikmagalur	3200 \pm 30	7.95	9	2.5	Oxford dados inéditos
Área de Chitradurga	3030 \pm 30	7.62	8	2.4	Oxford dados inéditos
<u>Wyoming U.S.A.</u>					
Granite Mountains	2750 \pm 70	8.27	17	"bem ajuste"	Rosholt et al., 1973

Parâmetros:

$\lambda_{235} = 0,98485 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$; $\lambda_{238} = 0,155125 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$; $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 137.88$; idade da Terra = $4,57 \times 10^9 \text{ a}$; Pb primordial na Troilita de Canyon Diablo, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 9.307$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 10.294$

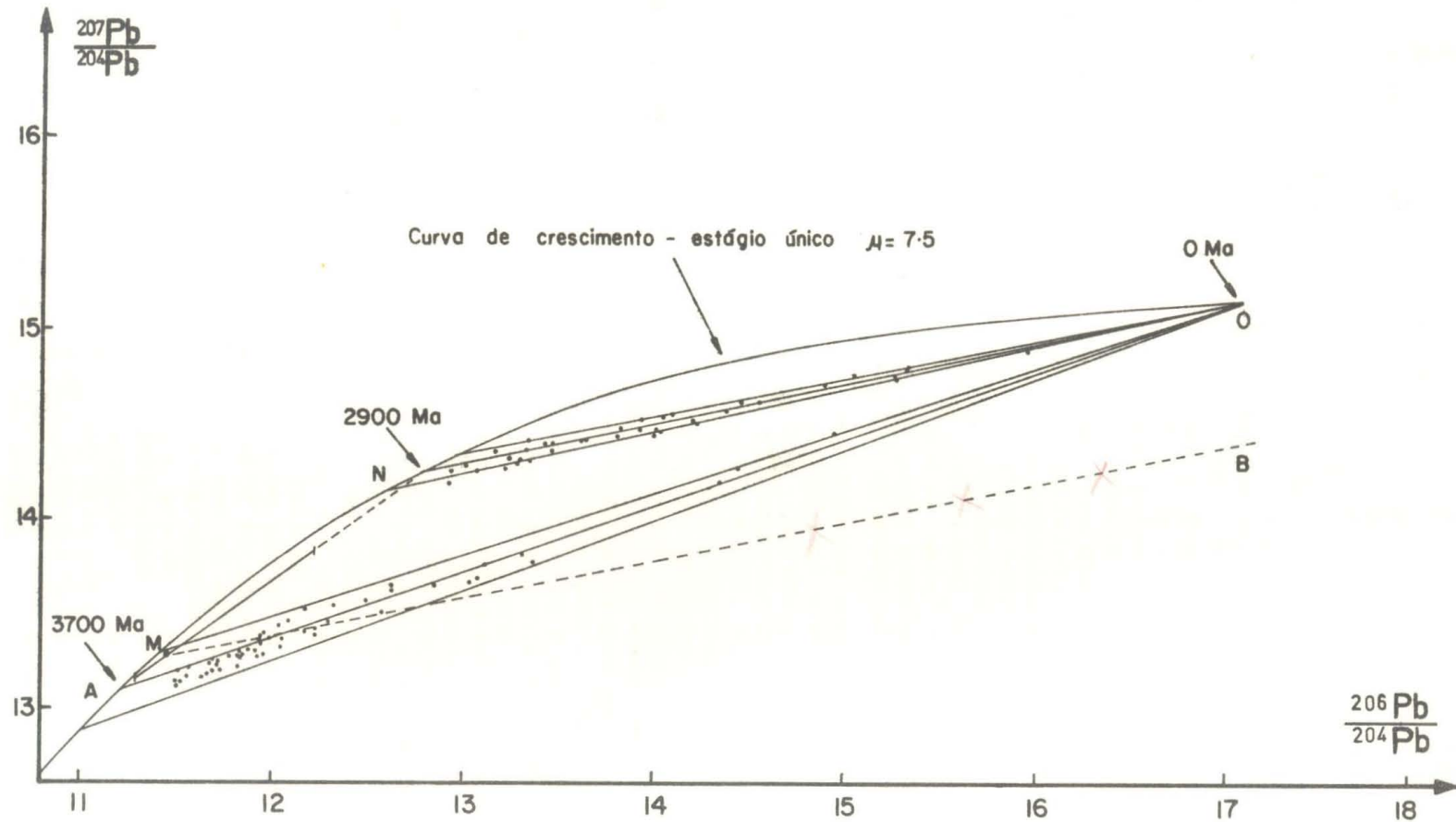


Figura 2 - Diagrama Pb/Pb para os dados dos Gnaisses Amîtsoq (AO) e Gnaisses Nûk (NO) da Groenlândia ocidental, situados em relação à curva de crescimento em estágio único com $\mu_1 = 7,5$. O intervalo das composições isotópicas dos Gnaisses Amîtsoq na época de 2900 Ma. atrás, encontra-se entre barras verticais sobre a linha AN. A média dos valores de composição isotópica dos Gnaisses Amîtsoq há 2900 Ma., encontra-se no ponto M. A linha MB mostra aproximadamente onde estariam hoje situados gnaisses do Arqueano tardio, se tivessem sido produzidos por fusão parcial dos gnaisses Amîtsoq, há 2900 Ma (Black et al., 1971 ; Moorbath et al 1975 b; Taylor et al., em preparação; dados inéditos em Oxford).

ria inteira de um dado setor de crosta continental. Este fato torna possível utilizar os isótopos de Pb para distinguir inequivocamente entre acreção de sial juvenil derivado do manto e retrabalhamento de crosta siálica muito mais antiga. A perda severa de U em relação ao Pb não se encontra restrita aos piroxênio-granulitos, mas se estende para muitos gnaisses de fácies anfibolito. O Urânio parece possuir maior mobilidade do que o Rb e o Th na crosta em desidratação, de tal forma que o U é até mais facilmente separado do Pb do que o Rb é separado do Sr. Como exemplo, os piroxênio-granulitos localizados a NW da Escócia, do Arqueano tardio (cerca de 2700 Ma.), bem como os gnaisses Amîtsoq da Groenlândia ocidental (de fácies anfibolito) do Arqueano precoce (3700 Ma.), possuem ambas composições isotópicas de Pb extremamente não radiogênicas, situadas próximas da intersecção de suas isócronas respectivas com a curva de crescimento do manto segundo o estágio único, para a evolução isotópica do Pb. Este fato indica que o desenvolvimento crustal do Pb nessas unidades ortognáissicas começou respectivamente em 2700 e 3700 Ma. atrás, ou apenas pouco antes (Moorbath et al, 1969; Black et al., 1971; Moorbath et al., 1975a; Chapman e Moorbath, 1977; Gancarz e Waserburg, 1977). Se os gnaisses Lewisianos ou Amîtsoq fossem parcialmente fundidos hoje, as razões isotópicas do Pb nos magmas granitoides resultantes seriam em ambos os casos muito menos radiogênicos do que a de qualquer rocha ígnea moderna derivada do manto. Em contraste, um magma moderno derivado de granulitos Lewisianos teria uma razão inicial Sr^{87}/Sr^{86} baixa, de cerca 0,703 e típica do manto, enquanto que um magma moderno derivado de gnaisses Amîtsoq teria uma razão inicial Sr^{87}/Sr^{86} muito elevada, no intervalo de cerca de 0,72-0,74.

O mesmo princípio pode ser aplicado para determinar as relações isotópicas genéticas tanto dos gnaisses do Arqueano tardio (cerca de 2900 Ma.) da Groenlândia ocidental, fora da região de Godthaabsfjord (Fig.3, áreas de Nordland, Sukkertoppen, e Fiskenaesset), como da crosta arqueana precoce (cerca de 3700 Ma.) do tipo dos gnaisses Amîtsoq (notar que os assim chamados gnaisses Nûk, próprios da região de Godthaabsfjord mostram um tipo diferente de comportamento dos isótopos de Pb a ser descrito posteriormente). Os dados isotópicos de Sr mostram que estes gnaisses não são gnaisses Amîtsoq retrabalhados, com elevada razão Rb/Sr, do tipo exposto na região de Godthaabsfjord (ver acima; também Moorbath e Pankhurst, 1976). Entretanto, a partir dos dados isotópicos de Sr não pode ser excluída a possibilidade de que estes gnaisses do Arqueano tardio foram produzidos por fusão parcial de gnaisses do Arqueano precoce, profundos e com baixa razão Rb/Sr, nos quais as razões Rb/Sr e Sr^{87}/Sr^{86} não eram significativamente diferentes dos valores do manto contemporâneo. Em contraste, os gnaisses Amîtsoq conhecidos tornaram-se tão severamente empobrecidos de U em relação ao Pb, há cerca de 3700 Ma., de tal forma que a sua evolução isotópica de Pb virtualmente cessou naquela época e a maioria de suas razões Pb^{206}/Pb^{204} hoje varia entre cerca de 11,5 e 13,1 (Fig.2). Os gnaisses Amîtsoq de profundidades maiores dificilmente poderiam ser mais empobrecidos em U do que aqueles atualmente expostos. Daí conclui-se que qualquer fusão parcial dos gnaisses Amîtsoq conteria Pb não radiogênico cujo desenvolvimento na crosta teria iniciado em cerca de 3700 Ma. atrás. Medidas Pb/Pb em rocha total em inúmeras amostras de ortognáissicas do Arqueano tardio, fora da região de Godthaabsfjord, demonstram que a sistemática dos isótopos de Pb observada desenvolveu-se num ambiente crustal somente desde cerca de 2900 Ma. atrás, e não desde 3700 Ma. atrás (Black et al., 1973; Taylor, Moorbath, Goodwin e Petrykowski, em preparação). Isto é evidente na fig.2, na qual as isócronas dos gnaisses Amîtsoq e dos gnaisses do Arqueano tardio interceptam a curva de crescimento em estágio único, respectivamente em 3700 Ma. e 2900 Ma.. A parte contínua da linha AN entre as barras verticais mostra um intervalo calculado das composições isotópicas de Pb para os gnaisses Amîtsoq conhecidos há 2800 Ma. A composição isotópica média de Pb dos gnaisses Amîtsoq há 2900 Ma. encontra-se no ponto M. A linha tracejada MB mostra aproximada

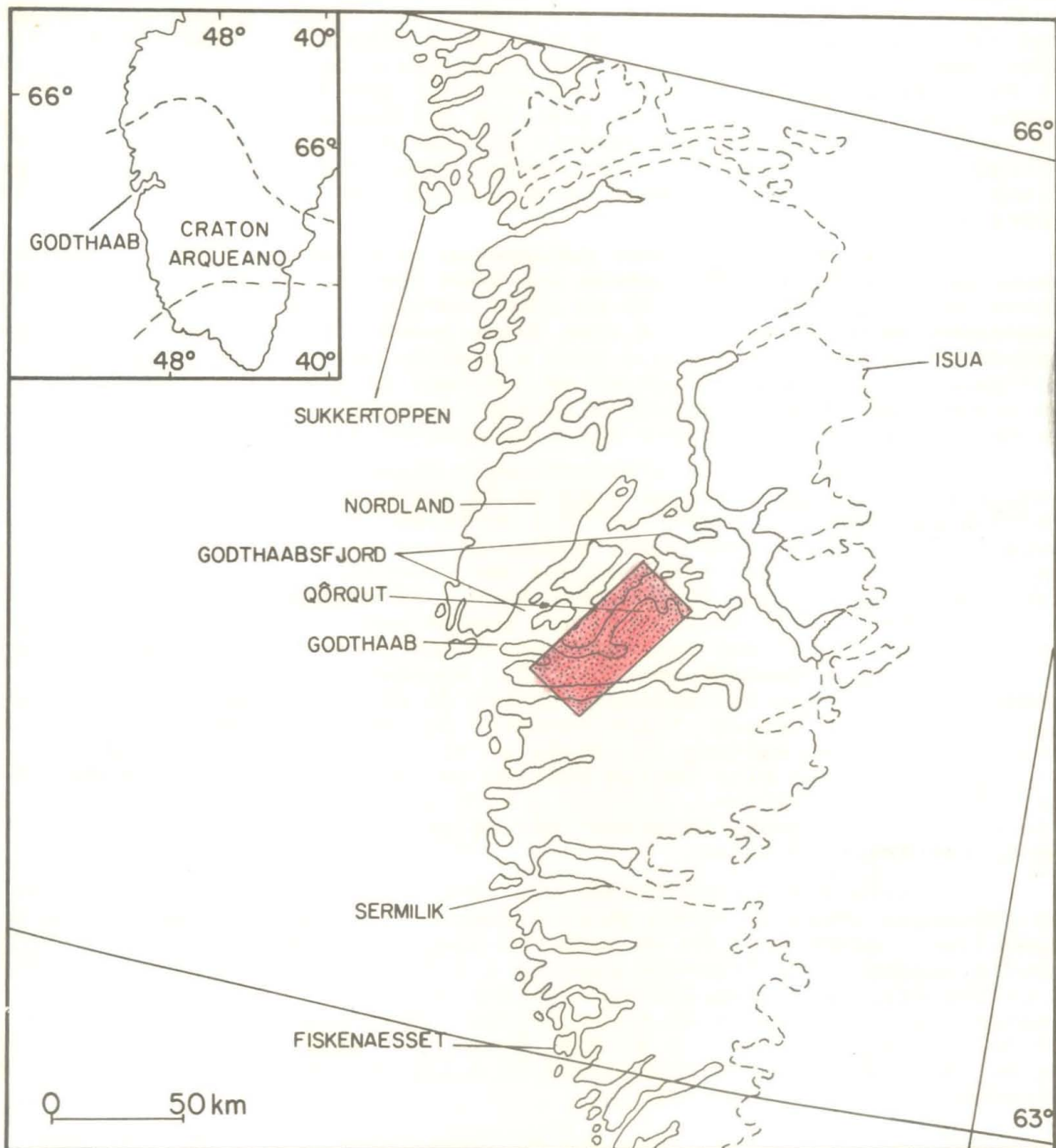


Figura 3 - Mapa esquemático da parte sul da Groenlândia ocidental, mostrando as localidades referidas no texto. Grande parte da área coberta pelo retângulo pontilhado é ocupada pelo Granito Qôrqut.

mente onde os gnaisses arqueanos estariam situados hoje se fossem produzidos por fusão parcial dos gnaisses Amîtsoq, cerca de 2900 Ma. atrás.

De modo similar, os estudos isotópicos de Pb nos gnaisses arqueanos tardios do NW da Escôcia descartam qualquer contribuição significativa da crosta continental do Arqueano precoce tipo Amîtsoq (Chapman e Moorbath, 1977), e o mesmo prevalece também para outros gnaisses do craton do Atlântico norte (ver Tabela 1). Da mesma forma, não há indicações nos isótopos de Pb de que os gnaisses Amîtsoq com 3700 Ma. possuem precursores continentais, siálicos e com idades significativamente maiores. Suas composições isotópicas de Pb iniciais proporcionam limitações temporais muito estreitas indicando que o desenvolvimento de seu Pb, na crosta, começou em época não anterior que 3700 Ma.. Consequentemente, não consideramos que os gnaisses Amîtsoq possam ser derivados pela fusão parcial ou retrabalhamento de crosta continental, siálica, mais antiga do que a sequência supra-crustal Isua, com 3800 Ma. (por exemplo Black et al., 1971; Baadsgaard et al., 1976; Gancarz e Wasserburg, 1977; Appel et al., 1978).

As principais feições isotópicas diagnósticas para o reconhecimento de crescimento continental num SADC não: a) concordância em idade entre isócronas Rb/Sr e Pb/Pb em rocha total; b) razões iniciais de Sr similares às do manto; c) valores de u_1 primários (U^{238}/Pb^{204} concentrando-se em torno de 7,5-8,0 para a região fonte), e d) composições isotópicas de Pb não radiogênico em gnaisses de alto grau, pobres em U, as quais indicam uma composição isotópica inicial do Pb próxima da curva de crescimento em estágio único apropriada à época do SADC.

É lamentável que a determinação direta das razões iniciais dos isótopos de Pb nas isócronas U/Pb em RT (isto é, diagramas de U^{238}/Pb^{204} x Pb^{206}/Pb^{204} , e U^{235}/Pb^{204} x Pb^{207}/Pb^{204}) não parece ser promissora. Em princípio, isto seria melhor do que derivar as razões isotópicas iniciais do Pb das intersecções das isócronas Pb/Pb com curvas de crescimento de estágio único. Entretanto, há muitas evidências de que o U pode ser perdido facilmente das rochas nas zonas de alteração íntem périca. Este efeito foi relatado por vários autores (por exemplo Black e Richard, 1972; Rosholt et al., 1973; Moorbath et al., 1975b). As sistemáticas Pb/Pb não são afetadas dentro da precisão das medidas visto que a perda de U ocorre "recentemente" do ponto de vista geológico. No caso dos gnaisses Amîtsoq (Moorbath et al., 1975b), isto leva à conclusão notável de que elas teriam sofrido severa perda de U em profundidade, há cerca de 3700 Ma., durante o SADC que os produziu, e de novo em "tempos geologicamente recentes", por um processo superficial, mas não em épocas intermediárias.

Desta forma, concluímos que, por analogia com o método Rb/Sr, as isócronas Pb/Pb em rocha total fornecem a época da diferenciação metamórfica e geoquímica de um complexo gnaissico. Os gnaisses da Groenlândia ocidental do Arqueano precoce e tardio, bem como muitos outros terrenos ortognáissicos, calco-alcalinos de todos os continentes representam SADC individuais de curta duração geocronológica (Moorbath, 1977, 1978a). Em muitos casos, a duração de um SADC pode não exceder as incertezas das medidas (aproximadamente 50 a 100 Ma.) nas correspondentes isócronas Pb/Pb em rocha total.

Reconhecimento do Retrabalhamento de Crosta Continental mais Antiga

Em contraste ao caso do SADC, considere-se agora um exemplo de retrabalhamento crustal, especificamente do granito Qôrquut o qual apresenta o último evento maior formador de rochas no Arqueano da região de Godthaabsfjord na Groenlândia ocidental, ocupando uma área de cerca de 1000 km² (Bridgwater et al., 1976). Uma isócrona Rb/Sr em RT publicada fornece uma idade de 2470 ± 90 Ma., com RI Sr^{87}/Sr^{86} correspondente de 0,709 ± 0,007 (Moorbath e Pankhurst, 1972). Trabalho adicional de

Moorbath e Taylor (em preparação) produziu uma isócrona em rocha total perfeita, com 23 pontos e com valores de 2530 ± 30 Ma. e $0,7083 \pm 0,004$. Esta RI elevada indica claramente certo grau de envolvimento crustal (ver fig. 1A).

Uma isócrona Pb/Pb em rocha total com 24 pontos nas mesmas amostras fornece idade de 2580 ± 80 Ma. (figura 4). A linha isocrônica situa-se bem abaixo da isócrona de referência para rochas derivadas de uma fonte no manto superior com valor de $u_1 = 7,5$ (característica da fonte a partir da qual os gnaisses Amítsoq e Nûk foram derivados). Além disso, vários dados isotópicos de Pb, em rochas totais do granito Qôrqt e em feldspatos de pegmatitos, situam-se sobre a isócrona de cerca de 2580 Ma., à esquerda da isócrona de primeiro estágio para 2580 Ma., numa clara demonstração que a evolução isotópica do Pb do granito Qôrqt não pode ser descrita por um modelo simples em dois estágios. Com a premissa (errônea) de um modelo em dois estágios o valor de u_1 calculado para a região fonte seria 6,23, muito mais baixo do que o intervalo 7,5-8,0 típico das regiões fonte de muitos ortognaisses arqueanos (tabela 1).

O granito Qôrqt claramente teve uma composição isotópica inicial de Pb pouco radiogênica e provavelmente próxima da composição isotópica medida do Pb menos radiogênico do feldspato de um pegmatito Qôrqt. Aquela composição isotópica é levemente mais radiogênica do que a composição isotópica média do Pb nos gnaisses Amítsoq na área de Godthaabsfjord, na época de cerca 2580 Ma. atrás. Não há outras fontes locais de Pb pronunciadamente não radiogênico conhecidas além dos gnaisses Amítsoq, concluindo-se que o magma do granito Qôrqt foi derivado principalmente por fusão do material dos gnaisses Amítsoq, os quais são os componentes predominantes nas encaixantes daquele granito. Entretanto, considerações detalhadas a respeito das composições isotópicas iniciais de Sr e Pb do granito Qôrqt (Moorbath e Taylor, em preparação) indicam que uma proporção menor de seu magma originou-se provavelmente de material de uma fonte mais jovem-com grande probabilidade os gnaisses Nûk - embora uma contribuição derivada do manto superior não possa ser excluída.

Mesmo que não houvessem outras informações sobre isótopos e idade de Pb/Pb para a região de Godthaabsfjord, o valor aparente de $u_1 = 6,23$ anormalmente baixo, em combinação com a alta relação $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_i$, levariam a postular uma fusão parcial da crosta siálica antiga, empobrecida em U, como produtora do granito Qôrqt. Estamos atualmente estudando diversos granitos proterozóicos da Groenlândia oriental e do noroeste da Escócia, com sistemática análoga, em seus isótopos de Pb.

Tornar-se-á óbvio que a fusão parcial de crosta siálica continental significativamente mais antiga pode dar origem a uma gama de permutações nas características isotópicas de Pb e Sr iniciais nos magmas graníticos resultantes, em função das características geoquímicas do nível crustal em que ocorre a fusão. Uma crosta profunda com baixas razões Rb/Sr e U/Pb produzirá valores de $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_i$ típicos do manto e Pb não radiogênico, uma crosta de nível intermediário com alta razão Rb/Sr e baixa razão U/Pb correspondendo "grosso modo" a rochas de fácies anfibolito produzirá $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_i$ elevada e Pb não radiogênico; uma crosta de níveis superiores, com altas razões Rb/Sr e U/Pb fornecerá $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_i$ elevada e Pb radiogênico. Estes são, obviamente, apenas 3 pontos arbitrariamente escolhidos naquilo que em verdade é um espectro contínuo de possibilidades, todas diferentes em relação às características isotópicas combinadas que seriam produzidas a partir de uma região fonte típica do manto. Apesar disso, algumas destas características isotópicas poderiam também ser produzidas em magmas de qualquer espécie submetidos à contaminação seletiva pela crosta continental circundante, embora critérios petrológicos, geoquímicos e isotópicos adicionais possam ser aplicados usualmente para o reconhecimento deste fe-

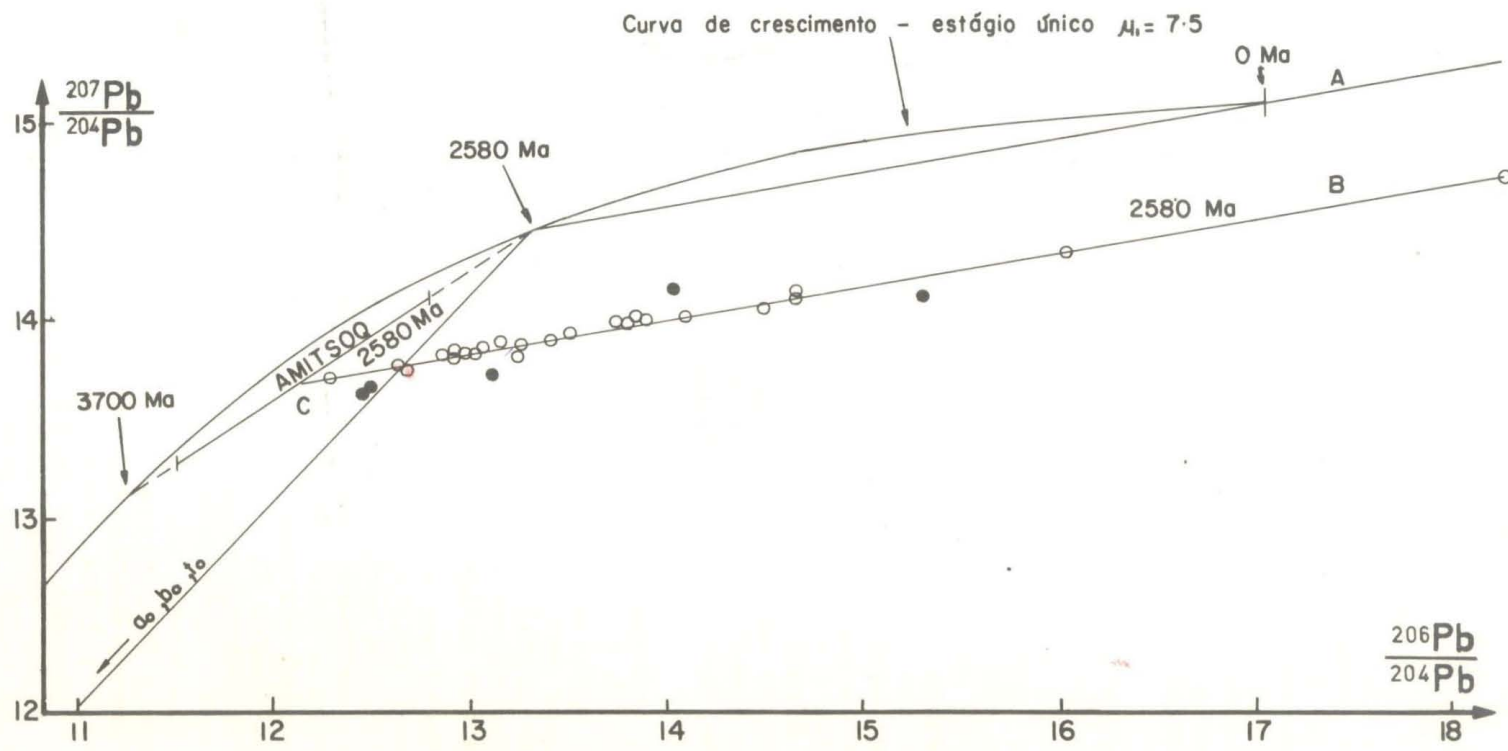


Figura 4 - Diagrama Pb/Pb para os dados do Granito Qôrqt da Groenlândia ocidental, em relação a curva de crescimento em estágio único com $\mu_1 = 7,5$. A linha BC, de 2.580 Ma., foi obtida por regressão tendo sido utilizado apenas os 24 pontos marcados por círculos vazios. A parte da linha 3700-2580 Ma., que se encontra entre barras verticais, representa o intervalo das composições isotópicas do chumbo calculado para os Gnaisses Amítsoq, há 2580 Ma.. A linha A, mostra onde estariam situados os seus pontos, se o Granito Qôrqt tivesse sido produzido a partir de uma região fonte no manto, 2580 ma. atrás, similar àquela - que produziu os Gnaisses Nük (há 2900 Ma), como na fig.2 (Moorbath e Taylor em preparação).

nômeno (por exemplo Carter et al., 1978; Briquieu e Lancelot, 1979; Moor- bath e Thompson, 1980).

A composição isotópica inicial de Pb e Sr numa rocha granítica derivada da crosta aproxima-se de valores típicos do manto a medida que diminuem as diferenças em idade entre a produção, a partir do manto, do material crustal que posteriormente servirá de fonte para o granito, e o evento de retrabalhamento crustal em que este granito é formado. É obvio também que crosta básica com características geoquímicas similares às do manto superior não pode produzir qualquer contraste isotópico sig- nificativo com o manto superior. Estas limitações inerentes ao enfoque isotópico devem sempre ser levadas em conta e cada exemplo individual deve ser interpretado cuidadosamente em seus próprios méritos.

Reconhecimento do Embasamento Continental Antigo em Profundidade

Anteriormente foi mostrado que a sistemática Pb/Pb em rocha total dos gnaisses do Arqueano tardio (2900 Ma.) da Groenlândia ociden- tal, fora da região de Godthaabsfjord é inequívoca e indica a derivação dos seus geradores magmáticos de uma região fonte com U^{238}/Pb^{204} ($u_1=7,5$) típica do manto em, ou um pouco antes de, 2900 Ma. (ver também Black et al. 1973).

Entretanto, na própria região de Godthaabsfjord (Fig.3), onde os gnaisses Nûk do Arqueano tardio e os gnaisses Amîtsoq do Arqueano precoce afloram (McGregor, 1973, 1979; Bridgwater et al. 1976), a maio- ria dos gnaisses Nûk contém proporções variáveis de dois tipos de Pb i- sotopicamente distintos, que iniciaram seu respectivo desenvolvimento crustal em torno de 2900 e 3700 Ma.. As restrições impostas pelos isó- topos de Pb e Sr demonstram claramente que os gnaisses Nûk não são deri- vados por retrabalhamento ou refusão dos gnaisses Amîtsoq, pelo contrá- rio, mostram que a mistura do Pb do Arqueano precoce com o do tardio re- sulta de uma contaminação seletiva, que envolve extração de Pb não ra- diogênico derivado da crosta continental tipo Amîtsoq com 3700 Ma., in- vadida pelos magmas Nûk, e pela adição deste Pb a esses magmas (Taylor, Moor bath, Goodwin e Petrykowski, em preparação).

Isto é claramente ilustrado na figura 5, na qual os gnaisses Nûk e diversos corpos anortosíticos associados da região de Godthaabsf- jord, dispersam-se bem abaixo da linha traçada para os gnaisses do Ar- queano tardio contemporâneos, situados em outra região, mas bem acima de uma isócrona hipotética de rochas derivadas dos gnaisses Amîtsoq. Ca- da ponto individual de Pb misturado começa seu desenvolvimento radiogê- nico em torno de 2900 Ma., em algum ponto ao longo de uma linha de mis- tura que junta os pontos de 3700 Ma. e 2900 Ma., sobre a curva de cresci- mento em estágio único. Cada linha individual de desenvolvimento radio- gênico até o presente possui uma inclinação de 2900 Ma. aproximadamen- te, elaborada por um conjunto de rochas relativamente pequeno e petrolo- gicamente homogêneo, que apesar disso produzem isócronas de qualidade acei- tável, indicando que as misturas de Pb iniciais nas câmaras magmáticas Nûk foram mais ou menos homogêneas (não mostrado na Figura 5). Além disso existe uma relação entre o grau de contaminação isotópica de uma amostra determinada (isto é, a distância para baixo da linha limite su- perior para os gnaisses não contaminados) e a concentração de Pb. As amostras isotopicamente mais contaminadas geralmente possuem os maiores conteúdos em Pb, bem como de outros elementos incompatíveis, tais como K, Rb e U.

Variações na quantidade de contaminação isotópica de Pb apare- cem numa escala de dezenas a centenas de metros no interior das unida- des intrusivas individuais. Isto sugere que o processo de contaminação ocorre próximo do local de posicionamento, e certamente descarta qual- quer heterogeneidade profunda (manto) como a causa primária da hetero- geneidade isotópica do Pb inicial dos magmas Nûk.

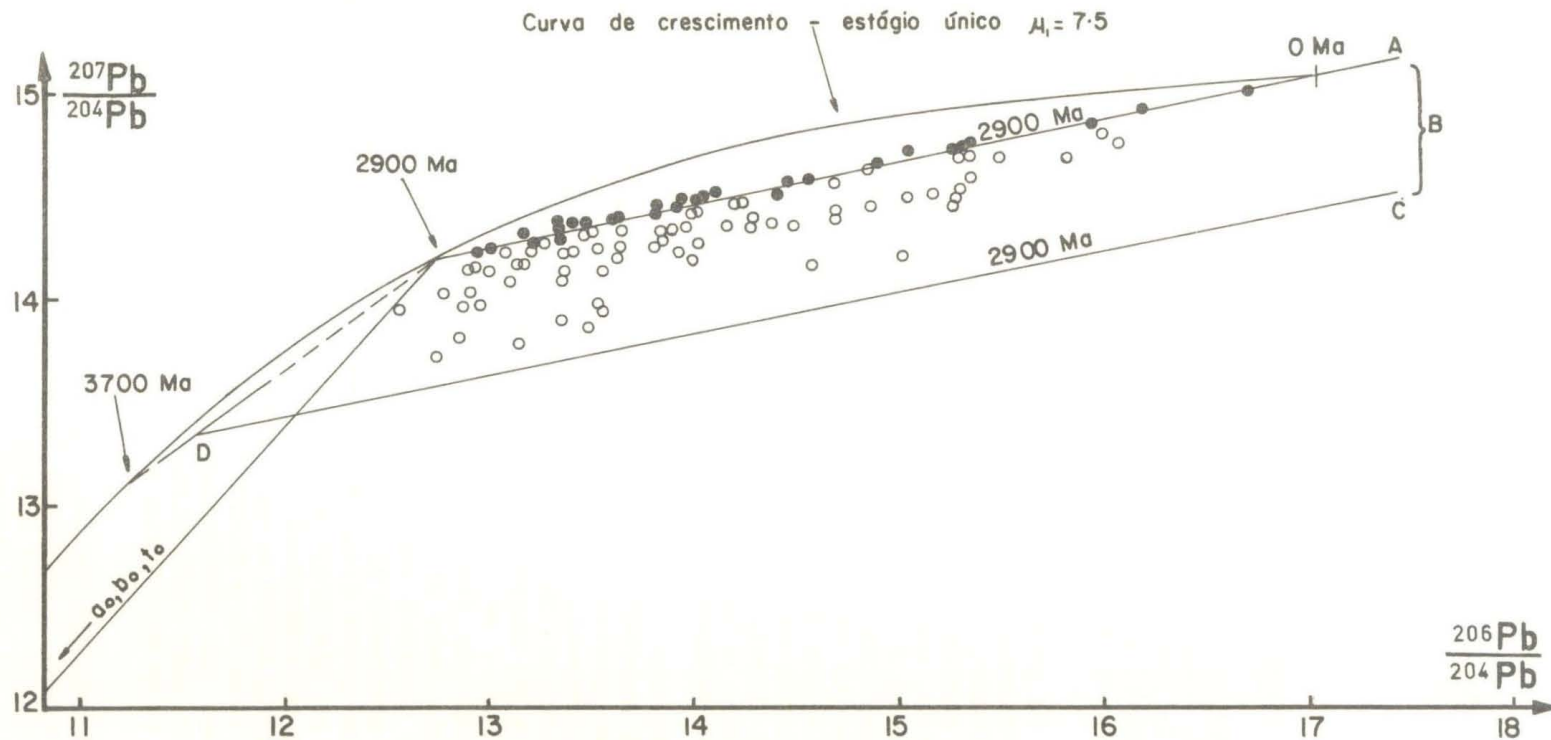


Figura 5 - Diagrama Pb/Pb para dados dos Gnaisses Nûk e Anortositos associados da região de Godthaabsfjord da Groenlândia ocidental, que foram contaminados com o chumbo tipo Amîtsoq (círculos vazios campo B), como explicado no texto. A linha A foi obtida por regressão, utilizando os equivalentes não contaminados dos Gnaisses Nûk, que ocorrem nas áreas de Sukkertoppen, Nordland e Fiskenaesset (Figs. 2 e 3). A linha DC, indica onde estariam situados agora, gnaisses do Arqueano tardio se tivessem sido produzidos por fusão parcial dos Gnaisses Amîtsoq há 2900 Ma. (Taylor et al em preparação).

Utilizando os isótopos de Pb no modelo descrito acima, não foi possível detectar qualquer crosta continental tipo Amîtsoq do Arqueano precoce em áreas situadas a mais de 10 a 15 km dos afloramentos conhecidos dos gnaisses Amîtsoq no interior da região de Godthaabsfjord. Concluímos que tal crosta não existe em profundidade nos outros lugares da parte sul da Groenlândia ocidental. Trabalhos com isótopos de Pb em muitos gnaisses do Arqueano tardio de outras partes do craton do Atlântico Norte, por exemplo na NW da Escócia (Chapman e Moor bath, 1977), na Groenlândia Oriental (Taylor et al., inédito), Noruega setentrional (Griffin et al. 1978; Jacobsen e Wasserburg, 1978) falham da mesma maneira, em proporcionar evidências para um embasamento continental subjacente do Arqueano precoce. Todos esses gnaisses (com exceção dos gnaisses Vikan da Noruega Setentrional, ver seção seguinte) possuem sistemáticas Pb-Pb em rocha total simples, análogas às dos gnaisses do Arqueano tardio da Groenlândia ocidental fora da região de Godthaabsfjord (Tabela 1). Além disso não há evidência isotópica de Pb "tipo contaminação" como as mostradas acima para sugerir que os gnaisses Amîtsoq com 3700 Ma. foram posicionados para dentro de qualquer embasamento siálico continental de idade significativamente maior. A evolução rápida do Pb radiogênico no manto superior durante o Arqueano precoce tornaria a detecção de Pb mistos contaminados particularmente inequívoca.

O enfoque delineado nesta seção deverá comprovar-se como uma ferramenta muito poderosa e largamente aplicável para o "mapeamento" superficial da crosta siálica continental mais antiga, e portanto para o estudo do crescimento da crosta continental com o tempo.

Reconhecimento de Efeitos de Metamorfismo de Alto Grau bem após a Cristalização Ígnea Primária

O método isocrônico em rocha total Pb/Pb pode produzir resultados falsos, em idade quando o metamorfismo de alto grau afeta uma unidade litológica muito tempo após sua formação primária, ou seja quando a acreção crustal e a diferenciação metamórfica/geoquímica final não fazem parte do mesmo SADC. Por exemplo, Taylor (1975) publicou uma idade isocrônica Pb/Pb em rocha total de 3410 ± 70 Ma. para os gnaisses migmatíticos Vikan de Langoy, Versteralen, Noruega setentrional, e concluiu originalmente que tal idade referia-se ao evento formador do gnaisse. Uma isócrona Rb/Sr em rocha total nas mesmas amostras forneceu uma idade de 2300 ± 150 Ma. com R.I. de $0,7126 \pm 0,0011$. Algumas feições anômalas da sistemática isotópica do Pb, a discordância entre as idades Pb/Pb e Rb/Sr, bem como medidas isotópicas adicionais de Pb, Sr e Nd (Griffin et al., 1978; Jacobsen e Wasserburg, 1978; Taylor, em preparação) conduziram a uma reinterpretação drástica. O elevado valor U^{238}/Pb^{204} (u_1) de 8,9 inferido para a região fonte dos gnaisses Vikan em base de um modelo em estágio único (comparado com valores típicos de cerca de 7,5-8,0), bem como a ausência de qualquer composição isotópica de Pb particular não radiogênica, são altamente inusitados em comparação com outros terrenos pré-Cambrianos com gnaisses de alto grau, para os quais dados Pb-Pb são normalmente disponíveis. Está claro agora que o espectro atual das composições isotópicas do Pb não pode ter resultado de um estágio único de evolução isotópica de Pb a partir de uma composição isotópica inicial uniforme. Foi demonstrado de modo convincente que o arranjo linear dos dados Pb-Pb em rocha total relatado por Taylor (75) resultou da formação do protolito dos gnaisses Vikan a partir de uma região fonte no manto superior, em cerca de 2600-2700 Ma. atrás, seguida por uma severa perturbação dos sistemas de rocha total U/Pb e Rb/Sr (especificamente perda de U e Rb) durante um metamorfismo de fácies granulito ocorrido há cerca de 1800 Ma.

O arranjo linear Pb-Pb para os gnaisses Vikan, portanto, não é mais considerado como uma verdadeira isócrona secundária, mas como uma "paleoisócrona transposta" (Griffin et al., 1978) em que os dados

isotópicos do Pb atuais colocam-se numa linha levemente transposta, a partir daquela que une os pontos correspondentes a 2700 Ma e 1800 Ma., na curva de crescimento do manto segundo estágio único (isto é a isócrona de rochas com 2700 Ma. em cerca de 1800 Ma.). Isto é ilustrado na figura 6. Claramente, a interceptação da linha que une os pontos 2700 Ma. e 1800 Ma. na curva de crescimento em estágio único fornecerá uma idade anormalmente elevada se o modelo simples em dois estágios for assumido. A transposição da "paleoisócrona" entre cerca de 2700 Ma. e 1800 Ma. resulta do desenvolvimento de Pb radiogênico num ambiente com relação U/Pb baixa desde 1800 Ma. até o presente.

Parece provável que casos adicionais deste tipo aparecerão, vindo a produzir avanços importantes na compreensão da evolução crustal de longo termo. As sistemáticas isotópicas combinadas de Pb, Sr, Nd, em tais casos, são muito diferentes daquelas observadas durante a acreção crustal e diferenciação metamórfica/geoquímica penecontemporânea, e não menos importante pela discordância aparente entre métodos isotópicos distintos. Entretanto, desde que diversos métodos isotópicos diferentes sejam utilizados, as interpretações deverão ser inequívocas. Os gnaisses Vikan forneceram um exemplo claro de reativação geoquímica de crosta continental muito mais antiga, e como tais são isotopicamente reconhecíveis como o exemplo contrastante à acreção e diferenciação crustal durante um único episódio principal de crescimento continental. Por analogia, consideramos que a abordagem isotópica combinada é capaz, em princípio, de resolver as complexidades geoquímicas e geocronológicas de gnaisses e outras unidades rochosas que sofreram metassomatismo e/ou retrometamorfismo em alguma época bem após sua formação primária. Pouco trabalho isotópico foi relatado até o presente para tais terrenos gnaissícos, onde os mencionados processos são claramente reconhecidos. Entretanto, pode ser previsto que os efeitos de metassomatismo e de retrometamorfismo, sobre as sistemáticas dos isótopos radiogênicos, sejam realmente muito diferentes daqueles postulados por Collerson e Fryer (78) em seu modelo convencional de metassomatismo maciço manto/crosta e transformação crustal.

ISÓTOPOS DO NEODÍMIO

No relato que se segue, todas as razões isotópicas de Nd são normalizadas em equivalência com $Nd^{150}/Nd^{142} = 0,2096$.

Avanços pioneiros consideráveis foram feitos nos últimos anos na aplicação do método $Sm^{147}-Nd^{143}$ para o estudo da evolução continental (De Paolo e Wasserburg, 1976a, 1976b; ver também revisão de O'Nions et al., 1979). Os resultados publicados encontram-se em boa concordância com as conclusões sobre evolução crustal obtidas a partir da sistemática isotópica de Sr e Pb, mas também fornecem condicionamentos adicionais importantes para a idade e a origem dos segmentos crustais maiores. O contraste principal entre o método $Sm-Nd$ com os métodos $Rb-Sr$ e $U-Pb$ reside na coerência geoquímica comparativa de Sm e Nd. Ao contrário do que ocorre com Rb e Sr, bem como com o U e Pb, estes dois elementos das terras raras (E.T.R.) não são fracionados em larga escala por processos crustais. Isto foi demonstrado vivamente por McCulloch e Wasserburg (1978), que obtiveram idades modelo $Sm-Nd$ de complexos gnaissícos do Escudo Canadense, representando porções das províncias estruturais Superior, Slave e Churchill, indicando que tais províncias foram formadas no período de cerca de 2700-2500 Ma., em concordância geral com muitas das publicações com dados $Rb-Sr$. Em adição, aqueles autores determinaram a época da proveniência sedimentar em muitas outras áreas, visto que, ao que parece, o sistema isotópico $Sm-Nd$ não é perturbado significativamente durante os processos sedimentares e diagenéticos.

Entretanto, o Nd é enriquecido relativamente ao Sm durante os processos magmáticos que conduzem à produção de crosta sílica a partir do manto superior. A crosta continental é um reservatório enriquecido

Figura 6 - Evolução isotópica do chumbo nos Gnaisses migmatíticos de Kikan, Noruega do Norte. Os pontos empregados foram corrigidos para a época de 1760 Ma. e portanto definem a paleo-isócrona de 1760 Ma., a inclinação da qual corresponde a uma idade de 2680 Ma.. Assumindo dois estágios para a evolução isotópica do chumbo até a época de 1760 Ma., o valor de $\mu_1 = 7,85$ é calculado para o primeiro estágio. A linha interrompida representa o arranjo inferior, para as composições isotópicas atuais dos Gnaisses Kikan (Taylor 1975). A inclinação desta linha não pode ser diferenciada, daquela relativa a paleo-isócrona de 1760 Ma. A linha interrompida é então interpretada como uma "paleo-isócrona transposta", resultante de incrementos pequenos e relativamente uniformes, nas razões Pb^{207}/Pb^{204} e Pb^{206}/Pb^{204} em todas as amostras, desde o estabelecimento de razões U^{238}/Pb^{204} muito baixa e relativamente uniformes, pela perda severa de Urânio durante o metamorfismo de alto grau, ocorrido há 1760 Ma. (Griffin et al. 1978; Jacobsen e Wasserburg, 1978; Taylor, ainda não publicado).

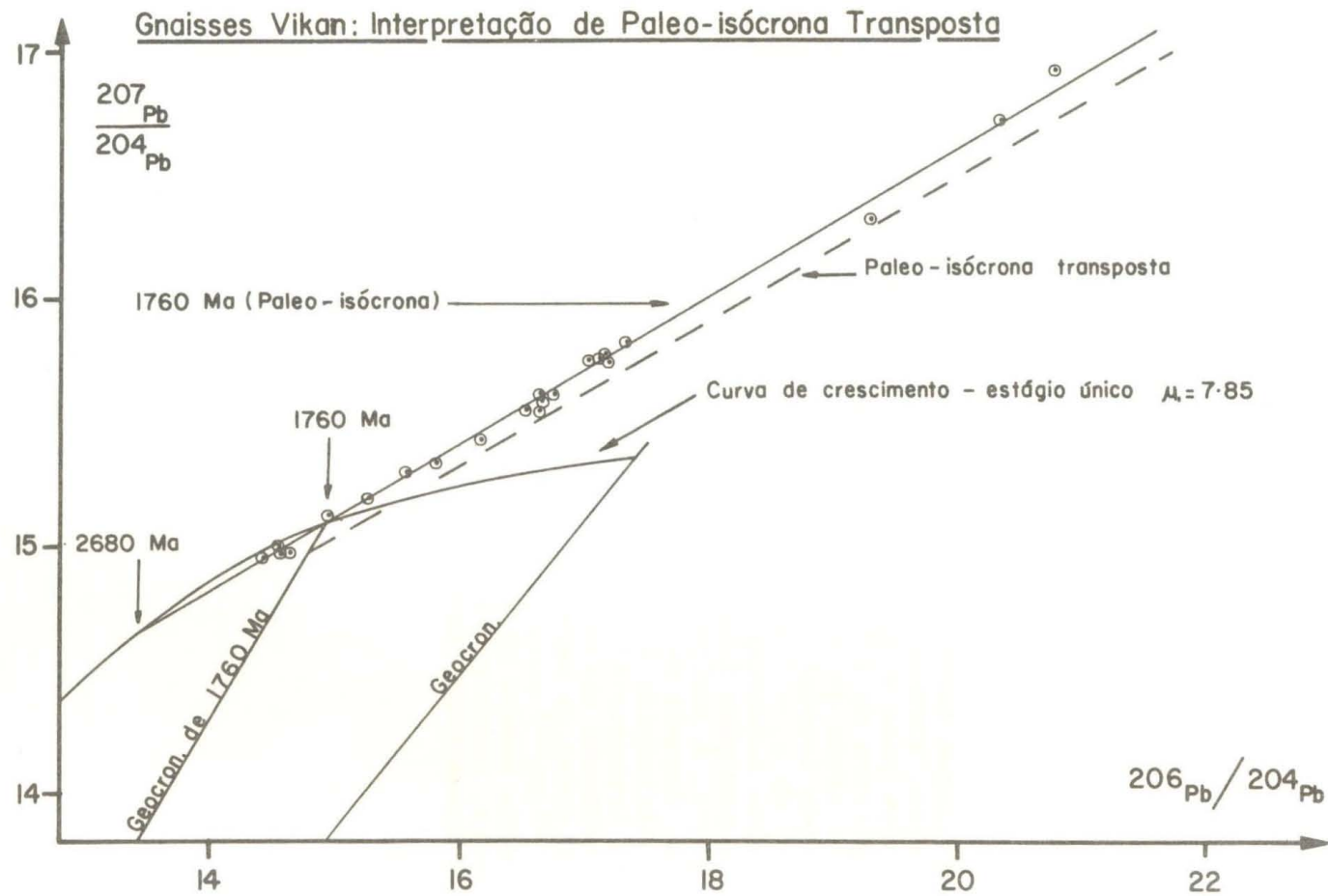


FIGURA 6

em terras raras leves em comparação ao manto superior. Hamilton et al. (1979a) sugeriram que a diferenciação manto-crosta pode ser datada precisamente através do método Sm-Nd. Eles relatam uma idade isocrônica Sm-Nd em rocha total para os gnaisses granulíticos Lewisian do NW da Escócia de 2920 ± 50 Ma., com $(Nd^{143}/Nd^{144})_i$ de $0,508959 \pm 49$. Esta idade é significativamente maior do que idades confiáveis Lewisianas Rb-Sr e Pb-Pb em rocha total, bem como de idades U-Pb em zircões, todas elas agrupando-se muito bem ao redor de 2650-2750 Ma. As composições isotópicas iniciais de Sr e de Pb dos gnaisses Lewisianos foram interpretadas como susceptíveis de permitir um intervalo máximo de tempo de cerca de 100-200 Ma. entre a formação dos precursores magmáticos dos gnaisses e a sua diferenciação metamórfica/geoquímica (Moorbath et al., 1969; 1975a; Chapman e Moorbath, 1977). A idade Sm-Nd de 2920 ± 50 Ma. é interpretada por Hamilton et al. (1979a) como a época da diferenciação manto-crosta que produziu os precursores magmáticos calco-alcalinos dos gnaisses Lewisianos. A diferença entre idades Sm-Nd e Pb-Pb em rocha total é de 240 ± 90 Ma., interpretada como o intervalo de tempo entre a criação crustal e diferenciação metamórfica/geoquímica, ocasião em que as amostras de rocha total tornaram-se sistemas fechados para migrações de Rb, Sr, U e Pb. A razão $(Nd^{143}/Nd^{144})_i$ dos precursores magmáticos Lewisianos situa-se sobre a curva de crescimento (condrítica) para o manto (ver abaixo, e Figura 7).

Desde que o manto e a crosta continental evoluam com razões Sm-Nd respectivamente altas e baixas, decorre que as razões $(Nd^{143}/Nd^{144})_i$ podem fornecer um critério útil para a caracterização da região fonte de qualquer rocha ígnea, determinada de modo análogo com os outros esquemas de decaimento. Com efeito, a velocidade de crescimento da razão Nd^{143}/Nd^{144} na crosta siânica é retardada em relação à do manto. Ainda não foram publicados trabalhos com o método Sm-Nd à respeito de granitos que poderiam ser esperados, por argumentos petrológicos, geoquímicos e isotópicos, como sendo produtos de anatexia de crosta antiga. Afastamentos significativos das razões iniciais Nd^{143}/Nd^{144} em relação a uma evolução isotópica de Nd típica do manto (condrítica) seriam esperados em tais casos. Além disso, parece que rochas magmáticas em ambiente crustal podem também estar sujeitas a perturbações isotópicas de Nd resultantes do tipo de interação magma-crosta que leva a fenômenos de contaminação seletiva e mistura isotópica, tal como foi discutido anteriormente em relação a outros sistemas isotópicos (por exemplo Carter et al., 1978b).

A íntima coerência geoquímica entre Sm e Nd torna possível datar de modo confiável sequências anfibolíticas de rochas supra-crustais arqueanas do tipo greenstone-belt que exibem frequentemente comportamento de sistema parcialmente aberto para Rb e/ou Sr (Hamilton et al., 1977, 1978, 1979b). Quase todas as razões $(Nd^{143}/Nd^{144})_i$ obtidas até o presente em isócronas Sm-Nd ou cálculos baseados em modelos (DePaolo e Wasserburg, 1976a, 1976b; O'Nions et al., 1979), em rochas arqueanas, situam-se sobre a curva de crescimento condrítica para o reservatório Terra inteira-manto ($Sm/Nd = 0,308$, equivalente a $Sm^{147}/Nd^{144} = 0,1936$, fig.7). Cada unidade rochosa analisada na figura 7 fornece uma idade Sm-Nd para o seu respectivo episódio de diferenciação manto-crosta junto com a correspondente relação inicial Nd^{143}/Nd^{144} da região fonte do manto daquela época. Qualquer pré-história crustal significativa é excluída para tais unidades litológicas.

O desenvolvimento progressivo de crosta continental deve ter aumentado a relação Sm/Nd no manto residual, de tal forma que este deveria possuir uma razão Nd^{143}/Nd^{144} maior do que a da Terra inteira (estimada em $0,51262$, ver O'Nions et al., 1979). O valor real das razões Nd^{143}/Nd^{144} medidas nos basaltos oceânicos modernos, entre $0,5125$ e $0,5133$, indica que segmentos diferentes do manto sofreram graus variados de fracionamentos de ETR, em épocas diferentes, como resultado da geração de magmas. A este respeito, O'Nions et al. (1979) declaram que

"a uniformidade aparente da razão Sm/Nd no reservatório do manto a partir do qual crosta continental foi extraída durante o Arqueano é talvez surpreendente em vista do fato de que o reservatório se altera como resposta ao crescimento continental. Esta uniformidade aparente pode refletir os efeitos combinados de um grande reservatório (por exemplo o manto inteiro) e extração uniforme de ETR no Arqueano, de maneira tal que foi insignificante a mudança na relação Sm/Nd no manto inteiro. Alternativamente, tal uniformidade pode refletir o isolamento das regiões-fonte no manto de modo que tenham escapado aos eventos de fracionamento. Avaliações diferentes entre essas duas possibilidades apresenta-se como um intrigante problema para o futuro".

Deve ser notado que na figura 7 as razões iniciais Nd^{143}/Nd^{144} de diversas rochas ígneas pós-arqueanas situam-se também sobre a linha de evolução do manto, embora uma exceção arqueana (complexo Stillwater, Montana) tenha sido recentemente relatada (De Paolo e Wasserburg, 1979).

Os dados isotópicos de Nd reforçam o argumento isotópico contrário aos modelos de evolução terrestre que incluem a criação da maioria da crosta continental muito cedo na história da Terra. A extração da crosta continental enriquecida em ETR leves a partir de uma "Terra inteira", com padrão condrítico de ETR, deixa necessariamente um manto residual empobrecido em ETR leves. Se a extração da crosta continental ocorreu muito cedo na história da Terra, a evolução isotópica do Nd num manto empobrecido em ETR leves deveria ter sido acelerada e divergir da linha de crescimento condrítico desde o Arqueano precoce para cá (para as ETR leves corresponde ao aumento da razão Sm/Nd para um valor maior do que o condrítico 0,308). De fato, como pode ser observado na figura 7, afastamentos das regiões fonte do manto em relação a uma evolução isotópica condrítica do Nd são muito pequenos até pelo menos o Proterozóico médio. Esta observação fornece um forte argumento contr uma formação precoce de grande parte da massa atual da crosta continental.

Jacobsen e Wasserburg (1979) deduziram uma idade média para a separação manto-crosta continental de cerca de 1800 Ma. a partir de considerações pormenorizadas sobre a divergência da evolução isotópica de Nd do manto superior em relação à linha evolutiva condrítica durante o Fanerozóico. Num modelo baseado no atualismo, com acreção crustal mais ou menos contínua, a idade média de cerca de 1800 Ma. implicaria realmente no início da acreção crustal há cerca de 3600 Ma., em razoável concordância com as idades dos segmentos mais antigos conhecidos de crosta siânica na Groenlândia ocidental, Labrador e África do Sul.

ISÓTOPOS RADIOGÊNICOS E EVOLUÇÃO DO MANTO

Este tópico relevante e extensamente documentado possui importante influência na evolução da crosta continental através do tempo geológico.

É bem conhecido o fato de que as regiões fontes diretas, no manto superior, dos basaltos oceânicos, são heterogêneas com relação às razões Sr^{87}/Sr^{86} , Pb^{206}/Pb^{204} , Pb^{207}/Pb^{204} , Pb^{208}/Pb^{204} e Nd^{143}/Nd^{144} , e que esta heterogeneidade foi desenvolvida por um período de tempo muito maior do que aquele relativo ao desenvolvimento das bacias oceânicas atuais. Com efeito, as idades calculadas a partir das inclinações das linhas de regressão Pb/Pb e Rb/Sr (muitas vezes chamadas "isócronas do manto") para os basaltos oceânicos sugerem que esta heterogeneidade isotópica existiu e evoluiu durante pelo menos 2000 Ma. (ver, por exemplo, Sun e Hanson, 1975; Brooks et al. 1976b). Há opiniões divergentes com relação ao desenvolvimento dessa heterogeneidade isotópica, contínua ou episódica, e isto depende muito da interpretação das linhas de regressão Pb/Pb e Rb/Sr. De qualquer forma as dispersões isotópicas demonstram a existência de heterogeneidades no manto superior com relação às razões Rb/Sr, U/Pb e Sm/Nd. Existem evidências que os materiais fontes

Figura 7 - Razões iniciais Nd^{143}/Nd^{144} de rochas ígneas (incluindo Orto-Gnaisses) em função da idade. Os dados para rochas vulcânicas de idades inferiores a 200 Ma. (sem código no diagrama), são os de De Paolo e Wasserburg, 1976 a; 1976 b; 1977. B. Ofiolitos de Bay of Islands, Newfoundland (Jacobsen e Wasserburg, 1979); T. Granito Town Mountain Llano Texas (De Paolo e Wasserburg, 1976 b); D. Gabro de Duluth em Minnesota (De Paolo e Wasserburg, 1976 b); G. Grande dique da Rodésia (De Paolo e Wasserburg, 1976 a); P. Batólito - Preissac-Lacorne, Província Superior no Canadá (De Paolo e Wasserburg, 1976 a); R. Cinturões verdes da Rodésia (Hamilton et al., 1977) e Granodiorito Louis Lake em Wyoming (De Paolo e Wasserburg, 1976 b); S. Complexo Stilwater em Montana (De Paolo e Wasserburg, 1979); M. Toleitos e Komatiitos de Munro Township e Abitibi belt do Canada (Zindler et al 1978); F. Anortosito Fiskenaesser da Groenlândia ocidental (De Paolo e Wasserburg, 1976 b); L. Gnaisses Lewisian do Noroeste da Escócia (Hamilton et al, 1979 a); O. Vulcânicos de Onverwacht na África meridional (Hamilton et al 1979 b); A. Gnaisses Amîtsoq da Groenlândia ocidental (De Paolo e Wasserburg, 1976 a); I. Supracrustais de Isua na Groenlândia ocidental (Hamilton et al. 1978).

A linha de evolução isotópica de Neodímio, J-J', para o A condrito Juninas, com $Sm/Nd = 0,308$, é muito próximo à média dos condritos. A-A' e P-P' são linhas de evolução isotópicas de Neodímio, para os Gnaisses Amîtsoq e para o Batólito Preissac-Lacorne, caracterizando a evolução isotópica do Neodímio, retardado da crosta continental. O Complexo de Stilwater é a única unidade rochosa arqueana, estudado até o presente. Apresenta uma razão inicial Nd^{143}/Nd^{144} , desviando-se significativamente da linha de evolução do manto Condritico, possivelmente como resultado de contaminação crustal.

Todos os dados foram recalculados para ajustar-se ao procedimento de De Paolo e Wasserburg, 1976 a; 1976 b, no caso de correção para fracionamento de massa. Constante de desintegração $\lambda_{Sm}^{147} = 6,54 \times 10^{-12} \text{ anos}^{-1}$.

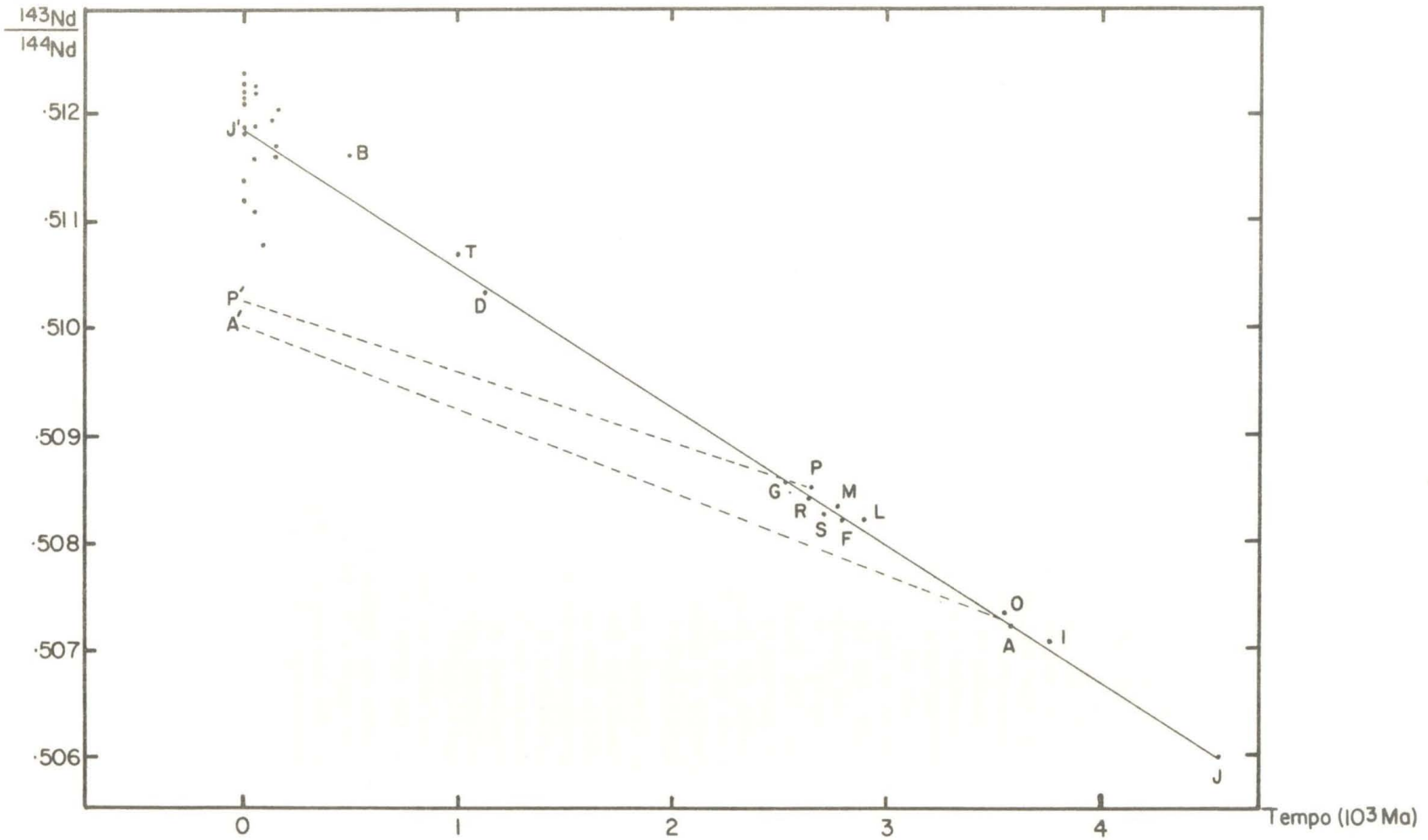


FIGURA 7

dos basaltos oceânicos, derivados a partir de níveis progressivamente mais profundos no manto, aproximam-se, em composição química e isotópica (correspondendo a um aumento na razão Rb/Sr e diminuição na razão Sm/Nd), da "Terra inteira" (modelo condrítico não empobrecido). Recentes estudos isotópicos combinados de Sr e Nd demonstram que a maioria dos basaltos das bacias oceânicas, incluindo aqueles da Islândia e do Hawaii, são derivados realmente de regiões fonte que foram empobrecidas em vários graus de Rb e das ETR leves (por exemplo, Nd relativamente a Sm). Alguns basaltos oceânicos tais como os de Tristão da Cunha ou dos Açores (Hawkesworth et al. 1979b), que possuem composições isotópicas similares às dos valores condríticos ou dos calculados para a "Terra Inteira", ($Nd^{143}/Nd^{144} = 0,51264$, $Sr^{87}/Sr^{86} = 0,705$, $Rb/Sr = 0,032$, ver O'Nions et al., 1977, 1978), são volumetricamente insignificantes nas bacias oceânicas. O'Nions et al. (1978) inferem que todos os basaltos recentes com razões Sr^{87}/Sr^{86} menores que 0,705 foram gerados em regiões fonte empobrecida, relativamente a "Terra Inteira". O mesmo princípio seguramente pode ser aplicado para muitas rochas ígneas continentais derivadas do manto. Com efeito, é provável que muitos conjuntos de rochas ígneas continentais com razões Sr^{87}/Sr^{86} maiores que 0,705 tenham provavelmente interagido com a crosta, produzindo um aumento concomitante na razão Sr^{87}/Sr^{86} por contaminação seletiva, com ou sem assimilação crustal associada, ou fusão parcial. Nós geralmente não favorecemos a idéia de uma origem no manto no caso de tais valores elevados da R.I. nas rochas ígneas continentais. Até o presente são poucas as evidências da existência de um manto sub-continental com razões isotópicas de Sr correspondentes às de uma "Terra Inteira" enriquecida (mas veja Carter et al., 1978a; Hawkesworth e Vollmer, 1978).

Dados isotópicos de Sr e Nd, ao lado de outros dados geoquímicos mostram, que as fontes das rochas ígneas oceânicas e continentais no manto superior tornaram-se progressivamente empobrecidas nos elementos litófilos Rb, Sr, K, U, Th, Sm e Nd durante grande parte do tempo geológico. Em associação com estes empobrecimentos, as razões Rb/Sr decresceram e as razões Sm/Nd cresceram nas fontes magmáticas do manto superior em relação à "Terra Inteira". Portanto, parece razoável supor que o empobrecimento do manto superior e criação de crosta sílica continental (enriquecida) sejam processos complementares. Claramente um método bem estabelecido e muito eficiente de produção de crosta continental a partir do manto superior são os processos relacionados com tectônica de placas em ambientes de arcos de ilhas e margens continentais. As razões iniciais dos isótopos radiogênicos de um conjunto de rochas magmáticas derivado do manto, e isento de contaminação crustal, representam, em tais ambientes, mistura de isótopos localmente homogeneizados e variáveis regionalmente. Derivam ou de litosfera oceânica subduzida (possivelmente contaminada com algum Sr derivado da água do mar e, de modo discutível, com pequenas quantidades de sedimentos subduzidos), bem como da cunha de manto superior a ela sobrejacente. Isto é bastante adequado para explicar pequenas variações na razão inicial entre regiões. Variações isotópicas maiores podem então ser impostas por processos de contaminação crustal de qualquer espécie, sempre que ocorra crosta continental.

As evidências para o empobrecimento geoquímico progressivo, acompanhado pelo aumento na heterogeneidade isotópica e geoquímica das regiões fontes das rochas ígneas oceânicas e continentais derivadas do manto, junto com as poderosas evidências isotópicas para o crescimento continental obtidas nas próprias rochas crustais, contestam fortemente os modelos muito debatidos de Armstrong (1968) e Armstrong e Hein (1973) nos quais a crosta continental é modelada por reciclagem contínua através do manto, com equilíbrio geoquímico e isotópico associado de tal forma que a região fonte das rochas ígneas do manto permanece como um reservatório sem empobrecimento e permanentemente intacto. Neste modelo estacionário toda a crosta continental é considerada como tendo sido produzida no início da história da Terra com mudanças subsequentes

em sua massa total muito pequenas. Em qualquer modelo de evolução continental baseada no atualismo, isso implicaria em subducção quantitativa de sedimentos, bem como uma mistura muito eficiente entre crosta e manto. É difícil enquadrar neste modelo a grande maioria das observações geológicas, geofísicas, geoquímicas e isotópicas dos últimos dez anos. Em contraste, nós consideramos que reciclagem de crosta continental através do manto ocorreu apenas numa escala menor, se ocorreu, desde a formação inicial da crosta continental típica, provavelmente há cerca de 3700 Ma.

CONCLUSÕES

As evidências geocronológicas e isotópicas associadas de Sr, Pb e Nd podem ser utilizadas de modo confiável para distinguir sial juvenil, derivado do manto, e crosta retrabalhada. Ambos os processos, crescimento continental e retrabalhamento, ocorreram durante grande parte do tempo geológico, usualmente em ambientes tectônicos diversos. Hoje, crescimento continental predomina em margens continentais, onde a litosfera oceânica em subducção bem como a cunha de manto sobrejacente são parcialmente fundidos e diferenciados para produzir magmas calco-alcálicos, enquanto que o retrabalhamento de crosta continental predomina nos cinturões móveis das regiões de colisão continental, onde as rochas magmáticas exibem comumente alto grau de complexidade isotópica.

Não há fortes razões para supor que este estado de coisas modificou-se fundamentalmente desde a época de formação da crosta continental mais antiga, embora a razão crescimento/retrabalhamento possa ter diminuído com o tempo. Dessa forma, a proporção de crescimento continental quase certamente decresceu com o tempo em virtude da diminuição na produção de calor da Terra (Brown, 1977; Brown e Hennessy, 1978), enquanto que a frequência e a escala de colisão continental devem ter aumentado com o tempo a medida que a crosta continental foi sendo criada. Ambos os processos de crescimento continental e alguma forma de mobilidade inter ou intra-cratônica tornaram-se plenamente estabelecidos como processos maiores da tectônica global no fim do Arqueano (3000-2500 Ma.), época em que talvez já existia 50 a 60% da massa total da crosta continental atual. Brown (1977) calculou uma proporção de crescimento global atual de $0,5 \text{ Km}^3$ por ano, de modo que levaria cerca de 10.000 Ma. para se produzir toda a massa de crosta continental hoje existente ($5 \times 10^5 \text{ km}^3$). Tal fato implica em assumir que a proporção de acreção deve ter sido maior no passado do que no presente (ver também Veizer e Jan sen, 1979).

Atualmente, a evolução da crosta terrestre durante os primeiros 800 Ma. da história da Terra ainda é em grande parte especulativa. A turbulência mecânica e termal resultante do impacto de planetésimos e/ou intensa convexão no manto inteiro (Elsasser et al., 1979) podem ter perfeitamente impedido a produção de uma crosta silícea, continental. Cerca de 3800 Ma. atrás crosta sólida de caráter provavelmente, simático (proto-oceânico?) foi capaz de suportar sedimentos e lavas, bem como uma hidrosfera. A crosta continental calco-alcálica mais antiga conhecida, espessa, estável, permanente, diferenciada do ponto de vista geoquímico e metamórfico, apareceu cerca de 3700 Ma. atrás. Durante o período 3700-3500 Ma., muitos núcleos continentais relativamente pequenos podem ter aparecido pela primeira vez na superfície da Terra. Em virtude da produção de calor elevado da Terra durante a sua história primitiva, a mistura convectiva em suas partes externas foi provavelmente muito mais eficiente do que no presente, e as "placas" podem ter sido mais finas, menores e muito mais numerosas. A produção de crosta continental a partir do manto antes de 3000-2700 Ma. atrás pode ter sido menos eficiente do que em épocas posteriores, por causa da maior proporção de reciclagem convectiva. Apesar disso, o aparecimento de talvez a primeira crosta continental há cerca de 3700 Ma. provavelmente marca o início de uma an

cestral da moderna tectônica de placas.

As evidências geológicas, geoquímicas, geocronológicas ou isotópicas para uma crosta granítica envolvendo o globo no início do pré-Cambriano são muito pequenas ou não existem. O mesmo ocorre para reciclagem maciça de crosta continental através do manto no tempo geológico, ou para misturas globais de crosta continental e manto numa escala grande (ver por exemplo Fyfe, 1976, 1978; Hargraves, 1976; Lowman, 1976; Shaw, 1976, etc.). A maioria das evidências modernas sugere que a história das partes mais externas da Terra é dominada pela diferenciação química irreversível do manto (e particularmente do manto superior) no tempo geológico, e pela permanência da crosta continental uma vez que seja formada. Não podemos, portanto, concordar com Fyfe (1978) quando diz que "conservação da massa crustal é um dos postulados básicos da tectônica de placas". Em princípio, os processos da tectônica de placas podem também levar a um aumento na massa crustal (por exemplo, Ringwood, 1974).

A quantidade dos sedimentos derivados dos continentes que entra em subducção e é fundida parcialmente para formar novas rochas ígneas é ainda assunto de muito debate (por exemplo Karig e Sharman, 1975; James, 1978; Molnar e Gray, 1979). Kay et al. (1978) sugerem que dados isotópicos Pb e Sr das ilhas Aleutas e Pribilof da Alaska podem ser explicados por uma mistura de cerca 2% de sedimentos derivados do continente com o líquido originado da subducção da crosta oceânica e de sua cunha de manto sobrejacente. Entretanto, é muito provável que quantidades significativas de material fundido a partir de sedimentos derivados de continentes ocorra em profundidade, no interior de bacias sedimentares marginais a regiões continentais, que produziriam os assim chamados granitos "tipo S" dos autores australianos (Chappell e White, 1974; Flood e Shaw, 1978). Como foi apontado antes, rochas graníticas verdadeiras podem ser produzidas a partir de uma variedade grande de precursores em diferentes tipos de ambientes tectônicos. Entretanto, consideramos as rochas largamente derivadas do manto das associações calco-alcalinas predominantemente intermediárias, de qualquer idade geológica e nível crustal, como verdadeiramente diagnósticas de acreção e crescimento continental.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Borming Jahn e Albrecht Hofmann pelos comentários construtivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLAART, J.H. - 1976 - The pre- 3760 m.y. old supracrustal rocks of the Isua area, Central West Greenland, and the associated occurrence of quartz-banded ironstone. In: B.F. Windley (Editor), The Early History of the Earth, Wiley, London, London, pp.177-189.
- ANDERSON, R.N., DELONG, S.E. and SCHWARZ, W.M. - 1978 - Thermal model for subduction with dehydration in the downgoing slab. Journal of Petrology, 86: 731-739.
- APPEL, P.W.U., MOORBATH, S. and TAYLOR, P.N. - 1978 - Least radiogenic terrestrial lead from Isua, West Greenland. Nature (London), 272: 524-526.
- ARMSTRONG, R.L. - 1968 - A model for the evolution of strontium and lead isotopes in a dynamic earth. Reviews of Geophysics, 6:175-199.
- ARMSTRONG, R.L. and HEIN, S.M. - 1973 - Computer simulation of Pb and Sr isotope evolution of the earth's crust and upper mantle. Geochi

mica et Cosmochimica Acta, 37: 1-18.

- ARMSTRONG, R.L., TAUBENECK, W.H. and HALES, P.O. - 1977 - Rb-Sr and K-Ar geochronometry of Mesozoic granitic rocks and their Sr isotopic composition, Oregon, Washington and Idaho. Bulletin of the Geological Society of America, 39: 325-362.
- ARTH, J.G. and HANSON, G.N. - 1975 - Geochemistry and origin of the Early Precambrian crust of northeastern Minnesota. Geochimica et Cosmochimica Acta, 39: 325-362.
- BAADSGAARD, H., LAMBERT, R.St.J., and KRUPICKA, J. - 1976 - Mineral isotopic age relationships in the polymetamorphic Amitsoq gneisses, Godthaab district, West Greenland. Geochimica et Cosmochimica Acta, 40: 513-527.
- BAADSGAARD, H., COLLERSON, K.D., and BRIDGWATER, D. - 1979 - The Archaean gneiss complex of northern Labrador. 1 Preliminary U-Th-Pb geochronology. Canadian Journal of Earth Sciences, 16: 951-961.
- BARKER, F. - 1979 - Trondhjemites, Dacites and Related Rocks. Elsevier, AMSTERDAM, 659 pp.
- BICKLE, M.J. - 1978 - Heat loss from the earth: a constraint on Archaean tectonics from the relation between geothermal gradients and the rate of plate production. Earth and Planetary Science Letters, 40: 301-315.
- BLACK, L.P. and RICHARDS, J.R. - 1972 - Rock lead isotopes in northeast Queensland. Journal of the Geological Society of Australia, 19: 321-330.
- BLACK, L.P., MOORBATH, S., PANKHURST, R.J. and WINDLEY, B.F. - 1973 - $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ whole rock age of the Archaean granulite facies metamorphic event in West Greenland. Nature Physical Science, 244: 50-53.
- BLACK, L.P., GALE, N.H., MOORBATH, S., PANKHURST, R.J. and MCGREGOR, V.R. - 1971 - Isotopic dating of very early Precambrian amphibolite facies gneisses from the Godthaab district, West Greenland. Earth and Planetary Science Letters, 12: 245-259.
- BLAXLAND, A.B., AFTALION, M. and VAN BREEMEN, O. - 1979 - Pb isotopic composition of feldspars from Scottish Caledonian granites, and the nature of the underlying crust. Scottish Journal of Geology, 15: 139-151.
- BRIDGWATER, D., KETO, L., MCGREGOR, V.R. and MYERS, J. - 1976 - Archaean Gneiss Complex of Greenland. In: A. Escher and W.S. Watt (Editors), Geology of Greenland. Geological Survey of Greenland, Copenhagen, pp. 19-75.
- BRIDGWATER, D., DAVIES, F.B., GILL, R.C.O., GORMAN, B.E., MYERS, J.S., Pedersen, S., and TAYLOR, P.N. - 1978 - Precambrian and Tertiary geology between Kangerdlugssuaq and Angmagssalik, East Greenland. Reports of the Geological Survey of Greenland, 83:1-17.
- BRIQUEU, L. and LANCELOT, J.R. - 1979 - Rb-Sr systematics and crustal contamination models for calc-alkaline igneous rocks. Earth Planetary Science Letters, 43: 385-396.
- BROOKS, C., JAMES, D.E., HART, S.R. - 1976a - Ancient lithosphere: its

- role in young continental volcanism. *Science*, 193: 1086-1094.
- BROOKS, C., HART, S.R., HOFMANN, A. and JAMES, D.E. - 1976b - Rb-Sr mantle isochrons from oceanic regions. *Earth and Planetary Science Letters*, 32: 51-61.
- BROWN, G.C. - 1977 - Mantle origin of Cordilleran granites. *Nature (London)*, 265: 21-24.
- BROWN, G.C. and HENNESSY, J. - 1978 - The initiation and diversity of granite magmatism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 288: 631-643.
- BURKE, K. and KIDD, W.S.F. - 1978 - Were Archaean continental geothermal gradients much steeper than those of today? *Nature (London)*, 272: 240-241.
- CARTER, S.R., EVENSEN, N.M., HAMILTON, P.J. and O'NIONS, R.K. - 1978a - Continental volcanics derived from enriched and depleted source regions: Nd- and Sr- isotope evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 37: 401-408.
- CARTER, S.R., EVENSEN, N.M., HAMILTON, P.J. and O'NIONS, R.K. - 1978b - Neodymium and strontium isotope evidence for crustal contamination of continental volcanics. *Science*, 202: 743-747.
- CHAPMAN, H.J. - 1978 - Geochronology and Isotope Geochemistry of Precambrian Rocks from Northwest Scotland. Unpublished D.Phil. thesis, Oxford University, p.255.
- CHAPMAN, H. and MOORBATH, S. - 1977 - Lead isotope measurements from the oldest recognised Lewisian gneisses of northwest Scotland. *Nature (London)*, 268: 41-42.
- CHAPPELL, B.W. and WHITE, A.J.R. - 1974 - Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173-174.
- COBBING, E.J., OZARD, J.M. and SNELLING, N.J. - 1977 - Reconnaissance geochronology of the crystalline basement rocks of the Coastal Cordillera of southern Peru. *Bulletin of the Geological Society of America*, 88: 241-246.
- COLLERSON, K.D. and FRYER, B.J. - 1978 - The role of fluids in the formation and subsequent development of early continental crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67: 151-167.
- DALMAYRAC, B., LANCELOT, J.R. and LEYRELOUP, A. - 1977 - Two-billion year granulites in the late Precambrian metamorphic basement along the southern Peruvian coast. *Science*, 198: 49-51.
- DAVIES, G.F. - 1979 - Thickness and thermal history of continental crust and root zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 44: 231-238.
- DE PAOLO, D.J. and WASSERBURG, G.J. - 1976a - Nd-isotope variations and petrogenetic models. *Geophysical Research Letters*, 3: 249-252.
- DE PAOLO, D.J. and WASSERBURG, G.J. - 1976b - Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. *Geophysical Research Letters*, 3: 743-746.
- DE PAOLO, D.J., and WASSERBURG, G.J. - 1977 - The sources of island

- arcs as indicated by Nd and Sr isotopic studies. *Geophysical Research Letters*, 4: 465-468.
- DE PAOLO, D.J. and WASSERBURG, G.J. - 1979 - Sm-Nd age of the Stillwater Complex and the mantle evolution curve for neodymium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 999-1008.
- ELSASSER, W.M., OLSON, P. and MARSH, B.D. - 1979 - The depth of mantle convection. *Journal of Geophysical Research*, 84: 147-155.
- ENGLAND, P.C. - 1979 - Continental geotherms during the Archaean. *Nature (London)*, 277: 556-558.
- FAURE, G. - 1977 - *Principles of Isotope Geology*. Wiley, New York, 464 pp.
- FAURE, G. and POWELL, J.L. - 1972 - *Strontium Isotope Geology*. Springer, Berlin, 188 p.
- FLOOD, R.H. and SHAW, S.E. - 1977 - Two "S-type" granite suites with low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the New England Batholith. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 61: 163-173.
- FRANCIS, P.W., MOORBATH, S. and THORPE, R.S. - 1977 - Strontium isotope data for Recent andesites in Ecuador and North Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, 37: 197-202.
- FYFE, W.S. - 1976 - Heat flow and magmatic activity in the Proterozoic. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 280: 655-660.
- FYFE, W.S. - 1978 - The evolution of the earth's crust: modern plate tectonics to ancient hot spot tectonics? *Chemical Geology*, 23: 89-114.
- GANCARZ, A.J. and WASSERBURG, G.J. - 1977 - Initial Pb of the Amitsoq Gneiss, West Greenland, and implications for the age of the earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41: 1283-1301.
- GLIKSON, A.V. - 1979 - Early Precambrian tonalite - trondhjemite sialic nuclei. *Earth-Science Reviews*, 15: 1-73.
- GRIFFIN, W.L., TAYLOR, P.N., HAKKINEN, J.W., HEIER, K.S., IDEN, I.K., KROGH, E.J., MALM, O., OLSEN, K.I., ORMAASEN, D.E. and TVETEN, E. - 1978 - Archaean and Proterozoic crustal evolution in Lofoten-Vesteralen, Norway. *Journal of the Geological Society of London*, 135: 629-647.
- HALPERN, M. - 1978 - Geological significance of Rb-Sr isotopic data of northern Chile crystalline rocks of the Andean orogen between latitudes 23° and 27° South. *Bulletin of the Geological Society of America*, 89: 522-532.
- HAMILTON, P.J., O'NIONS, R.K. and EVENSEN, N.M. - 1977 - Sm-Nd dating of basic and ultrabasic volcanics. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 263-268.
- HAMILTON, P.J., EVENSEN, N.M., O'NIONS, R.K. and TARNEY, J. - 1979a - Sm-Nd systematics of Lewisian gneisses: implications for the origin of granulites. *Nature (London)*, 277: 25-28.
- HAMILTON, P.J., O'NIONS, R.K., EVENSEN, N.M., BRIDGWATER, D. and ALLART, J.H. - 1978 - Sm-Nd isotopic investigations of Isua supracrustal

- tals and implication for mantle evolution. *Nature (London)*, 272:41-43.
- HAMILTON, P.J., EVENSEN, N.M., O'NIONS, R.K., SMITH H. and ERLAND, A.J. - 1979b - Sm-Nd dating of Onverwacht Group volcanics, southern Africa. *Nature (London)*, 279: 298-300.
- HANSON, G.N. - 1978 - The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 38: 26-43.
- HARGRAVES, R.B. - 1976 - Precambrian geologic history. *Science*, 193:363-371.
- HART, S.R. and BROOKS, C. - 1977 - The geochemistry and evolution of early Precambrian mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 61: 109-128.
- HAWKESWORTH, C.J. and VOLLMER, R. - 1978 - Crustal contamination versus enriched mantle: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ evidence from the Italian Volcanics. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69: 151-165.
- HAWKESWORTH, C.J., BICKLE, M.J. and GLEDHILL, A.R. - 1979a - A 2.9-b.y. old event in the Rhodesian Archaean. *Earth and Planetary Science Letters*, 43: 285-297.
- HAWKESWORTH, C.J., MOORBATH, S., O'NIONS, R.K. and WILSON, J.F. - 1975- Age relationships between greenstone belts and "granites" in the Rhodesian Archaean craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 25: 251-262.
- HAWKESWORTH, C.J., MORRY, M.J., RODDICK, J.C. and VOLLMER, R. - 1979b - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the Azores and their significance in LIL - element enriched mantle. *Nature (London)*, 280:28-31.
- HAWKESWORTH, C.J., NORRY, M.J., RODDICK, J.C., BAKER, P.E., FRANCIS, P. W. and Thorpe, R.S., 1979 c. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and incompatible element variations in calc-alkaline andesites and plateau lavas from South America. *Earth and Planetary Science Letters*, 42: 45-57.
- HEIER, K.S. - 1973 - Geochemistry of granulite facies rocks and problems of their origin. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 273: 429-442.
- HICKMAN, M. - 1974 - 3500-Myr-old granite in Southern Africa. *Nature*, 251: 295-296.
- HOFMANN, A. and HART, S.R. - 1978 - An assessment of local and regional isotopic equilibrium in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 38, 44-62.
- HURST, R.W. - 1978a - Sr evolution in the West Greenland-Labrador craton: a model for early Rb depletion in the mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 39-44.
- JACOBSEN, S.B. and WASSERBURG, G.J. - 1978 - Interpretation of Nd, Sr and Pb isotope data from Archaean migmatites in Lofoten-Vesteralen, Norway. *Earth and Planetary Science Letters*, 41: 245-253.
- JACOBSEN, S.B. and WASSERBURG, G.J. - 1979 - Nd and Sr isotopic compositions of early Palaeozoic oceanic crust and mantle and the evolu-

- tion of the source of mid-ocean ridge basalts. Abstracts of European Colloquium on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology VI, p.50.
- JAHN, B.M. and MURTHY, V.R. - 1975 - Rb-Sr ages of the Archaean rocks from the Vermilion district, northeastern Minnesota. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39: 1679-1689.
- JAMES, D.E. - 1978 - On the origin of calc-alkaline volcanics of the Central Andes: a revised interpretation. *Carnegie Institution of Washington Year Book*, 77: 562-590.
- JAMES, D.E.; BROOKS, C. and CUYUBAMBA, A. - 1976 - Andean Cenozoic volcanism: magma genesis in the light of strontium isotopic composition and trace element geochemistry. *Bulletin of the Geological Society of America*, 87: 592-600.
- JORDAN, T.H. - 1978 - Composition and development of the continental tectosphere. *Nature (London)*, 274: 544-548.
- KARIG, D.E. and SHARMAN, G.F. - 1975 - Subduction and accretion in trenches. *Bulletin of the Geological Society of America*, 86: 377-389.
- KAY, R.W., SUN, S.S. and LEE-HU, C.N. - 1978 - Pb and Sr isotopes in volcanic rocks of the Aleutian Islands and Pribilof Islands, Alaska.
- KLERKX, J., DEUTSCH, S., PICHLER, H. and ZEIL, W. - 1977 - Strontium isotopic composition and trace element data bearing on the origin of Cenozoic volcanic rocks of the Central and Southern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2: 49-71.
- KÖPPEL, V. and GRÜNENFELDER, M. - 1979 - Isotope geochemistry of Pb. In: E. Jäger and J.C. Hunziker (Editors), *Lectures in Isotope Geology*. Springer, Berlin, pp. 134-153.
- LEEMAN, W.P. and DASCH, E.J. - 1978 - Strontium, lead and oxygen isotopic investigations of the Skaergaard intrusion, East Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 41: 47-59.
- LEEMAN, W.P., DASCH, E.J. and KAYS, M.A. - 1976 - $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ whole-rock age of gneisses from the Kangerdlugssuaq area, eastern Greenland. *Nature*, 263: 469-471.
- LIPMAN, P.W., DOE, B.R., HEDGE, C.A. and STEVEN, I.A. - 1978 - Petrologic evolution of the San Juan volcanic field, south-western Colorado: Pb and Sr isotope evidence. *Bulletin of the Geological Society of America*, 89: 59-82.
- LOWMAN, P.D. - 1976 - Crustal evolution in silicate planets: implications for the origin of continents. *Journal of Geology*, 84: 1-26.
- MCCULLOCH, M.T. and WASSERBURG, G.J. - 1978 - Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science*, 200: 1003-1011.
- MCGREGOR, V.R. - 1973 - The early Precambrian gneisses of the Godthaab district, West Greenland. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 273: 343-358.
- MCGREGOR, V.R. - 1979 - Archaean gray gneisses and the origin of the continental crust: evidence from the Godthaab region, West Green-

- land. In: F.Barker (Editor), Trondhjemites, Dacites and Related Rocks. Elsevier, Amsterdam, pp. 169-204.
- MICHARD-VITRAC, A., LANCELOT, J., ALLÈGRE, C.J. and MOORBATH, S.- 1977- U-Pb ages on single zircons from the early Precambrian rocks of West Greenland and the Minnesota River Valley. Earth and Planetary Science Letters, 35: 448-453.
- MOLNAR, P. and GRAY, D. - 1979 - Subduction of continental lithosphere: some constraints and uncertainties. Geology, 7: 58-62.
- MOORBATH, S. - 1975a - Evolution of Precambrian crust from strontium isotopic evidence. Nature (London), 254: 395-398.
- MOORBATH, S. - 1975b - Geological interpretation of whole-rock isochron dates from high grade gneiss terrains. Nature (London), 255: 391.
- MOORBATH, S. - 1977 - Ages, isotopes and evolution of Precambrian continental crust. Chemical Geology, 20: 151-187.
- MOORBATH, S. - 1978a - Age and isotope evidence for the evolution of continental crust. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 288: 401-413.
- MOORBATH, S. - 1978b - Critical comment on "Sr evolution in the West Greenland-Labrador craton: a model for early Rb depletion in the mantle" by R.W. Hurst. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42: 1583 - 1584.
- MOORBATH, S. and WELKE, H.J. - 1969a - Lead isotope studies on igneous rocks from the Isle of Syke, northwest Scotland. Earth and Planetary Science Letters, 5: 217-230.
- MOORBATH, S. and WELKE, H.J. - 1969b - Isotopic evidence for the continental affinity of the Rockall Bank, North Atlantic. Earth and Planetary Science Letters, 5: 211-216.
- MOORBATH, S. and PANKHURST, R.J. - 1976 - Further Rb-Sr age and isotope evidence for the nature of the late Archaean plutonic event in West Greenland. Nature (London), 262: 124-126.
- MOORBATH, S. and THOMPSON, R.N. - 1980 - Strontium isotope geochemistry and petrogenesis of the early Tertiary lava pile of the Isle of Skye, Scotland, and other basic rocks of the British Tertiary Province: an example of magma-crust interaction. Journal of Petrology, in press.
- MOORBATH, S., WELKE, H. and GALE, N.H. - 1969 - The significance of lead isotope studies in ancient, high-grade metamorphic basement complexes as exemplified by the Lewisian rocks of northwest Scotland. Earth and Planetary Science Letters, 6: 245-256.
- MOORBATH, S., O'NIONS, R.K. and PANKHURST, R.J. - 1973 - Early Archaean age for the Isua Iron Formation, West Greenland. Nature (London), 245: 138-139.
- MOORBATH, S., POWELL, J.L. and TAYLOR, P.N. - 1975a - Isotopic evidence for the age and origin of the "grey gneiss" complex of the southern Outer Hebrides. Journal of the Geological Society of London, 131: 213-222.
- MOORBATH, S., O'NIONS, R.K. and PANKHURST, R.J. - 1975b - The evolution

- of Early Precambrian crustal rocks at Isua, West Greenland - geochemical and isotopic evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 27, 229-239.
- MOORBATH, S., WILSON, J.F. and COTTERILL, P. - 1976 - Early Archaean age for the Sebakwian Group at Selukwe, Rhodesia. *Nature (London)*, 244: 536-538.
- MOORBATH, S., THORPE, R.S. and GIBSON, I.L. - 1978 - Strontium isotope evidence for petrogenesis of Mexican andesites. *Nature (London)*, 271: 437-439.
- MOORBATH, S., O'NIONS, R.K., PANKHURST, R.J. and MCGREGOR, V.R. - 1972 - Further rubidium-strontium age determinations on the very early Precambrian rocks of the Godthaab district, West Greenland. *Nature Physical Science*, 240: 78-82.
- MOORBATH, S., WILSON, J.F., GOODWIN, R. and HUMM, M. - 1977 - Further Rb-Sr age and isotope data on early and late Archaean rocks from the Rhodesian craton. *Precambrian Research*, 5: 229-239.
- O'NIONS, R.K. and PANKHURST, R.J. - 1978 - Early Archaean rocks and geochemical evolution of the earth's crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 38: 211-236.
- O'NIONS, R.K., HAMILTON, P.J. and EVENSEN, N.M. - 1977 - Variations in $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 34: 13-22.
- O'NIONS, R.K., EVENSEN, N.M., HAMILTON, P.J. and CARTER, S.R. - 1978 - Melting of the mantle past and present: isotope and trace element evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 258, 547-559.
- O'NIONS, R.K., CARTER, S.R., EVENSEN, N.M. and HAMILTON, P.J. - 1979 - Geochemical and cosmochemical applications of Nd isotope analysis. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 7:11-38.
- OVERSBY, V.M. - 1974 - New look at the lead-isotope growth curve. *Nature (London)*, 248: 132-133.
- PANKHURST, R.J. - 1977 - Strontium isotope evidence for mantle events in the continental lithosphere. *Journal of the Geological Society of London*, 134: 255-268.
- PATCHETT, R.J. - 1980 - Thermal effects of basalt on continental crust and crustal contamination of magmas. *Nature (London)* 283: 559-561.
- PETERMAN, Z.E. - 1979 - Strontium isotope geochemistry of late Archaean to late Cretaceous tonalites and trondhjemites. In: F. Barker (Editor), *Trondhjemites, Dacites and Related Rocks*. Elsevier, Amsterdam, pp. 133-147.
- RINGWOOD, A.E. - 1974 - The petrological evolution of island arc systems. *Journal of the Geological Society of London*, 130: 183-204.
- RODDICK, J.C., COMPSTON, W. and DURNEY, D.W. - 1976 - The radiometric age of the Mount Keith Granodiorite: a maximum age estimate for an Archaean greenstone sequence in the Yilgarn block, Western Australia. *Precambrian Research*, 3: 55-78.
- ROSHOLT, J.N., ZARTMAN, R.E. and NKOMO, I.T. - 1973 - Lead isotope sys-

tematics and uranium depletion in the Granite Mountains, Wyoming. Bulletin of the Geological Society of America, 84: 989-1002.

- RUSSELL, R.D. and FARQUHAR R.M. - 1960 - Lead Isotopes in Geology Interscience, New York, 243 pp.
- SHACKLETON, R.M., RIES, A.C., COWARD, M.P. and COBBOLD, P.R. - 1979 - Structure, metamorphism and geochronology of the Arequipa Massif of coastal Peru. Journal of the Geological Society of London, 136: 195-214.
- SHAW, D.M. - 1976 - Development of the early continental crust. In: B. F. Windley (Editor), The Early History of the Earth. Wiley, London, pp. 33-53.
- STERN, C.R., HUANG, W.L. and WYLLIE, P.J. - 1975 - Basalt-andesite-rhyolite- H_2O : crystallisation intervals with excess H_2O and H_2O -undersaturated liquidus surfaces to 35 kilobars, with implications for magma genesis. Earth and Planetary Science Letters, 28: 189-196.
- SUN, S.S. and HANSON, G.N. - 1975 - Evolution of the mantle: geochemical evidence from alkali basalt. Geology, 3: 297-302.
- TARNEY, J. and WINDLEY, B.F. - 1977 - Chemistry, thermal gradients and evolution of the lower continental crust. Journal of the Geological Society of London, 134: 153-172.
- TARNEY, J., DALZIEL, I.W.D. and de WIT, M.J. - 1976 - Marginal "Rocas Verdes" Complex from S.Chile: a model for Archaean greenstone belt formation. In: B.F. Windley (Editor), The Early History of the Earth. Wiley, London, pp. 131-146.
- TARNEY, J., WEAVER, B. and DRURY, S.A. - 1979 - Geochemistry of Archaean trondhjemitic and tonalitic gneisses from Scotland and East Greenland. In: F.Barker (Editor), Trondhjemites, Dacites and Related Rocks. Elsevier, Amsterdam, pp. 275-299.
- TAYLOR, P.N. - 1975 - An early Precambrian age for migmatitic gneisses from Vikan i Bø, Vesteralen, North Norway. Earth and Planetary Science Letters, 27: 35-42.
- TAYLOR, P.N., MOORBATH, S., GOODWIN, R. and PETRYKOWSKI, A.C. Crustal contamination as an indicator of the extent of early Archaean continental crust: Pb isotopic evidence from the late Archaean gneisses of West Greenland. Submitted to Geochimica et Cosmochimica Acta.
- THORPE, R.S. and FRANCIS, P.W. - 1979 - Variations in Andean andesite compositions and their petrogenetic significance. Tectonophysics, 57: 53-70.
- THORPE, R.S., POTTS, P.J. and FRANCIS, P.W. - 1976 - Rare earth data and petrogenesis of andesite from the North Chilean Andes. Contributions to Mineralogy and Petrology, 54: 65-78.
- THORPE, R.S., FRANCIS, P.W. and MOORBATH, S. - 1979 - Strontium isotope evidence for petrogenesis of Central American andesites. Nature (London), 277: 44-45.
- VAN BREEMEN, O., AFTALION, M. and ALLAART, J.H. - 1974 - Isotopic and geochemical studies on granites from the Ketilidian mobile belt of South Greenland. Bulletin of the Geological Society of America

ca, 85: 403-412.

VEIZER, J. and JANSEN, S.L. - 1979 - Basement and sedimentary recycling and continental evolution. *Journal of Geology*, 87: 341-370.

WELLS, P.R.A. - 1979 - Chemical and thermal evolution of Archaean sialic crust, southern West Greenland. *Journal of Petrology*, 20: 187-226.

WELLS, P.R.A. - 1980 - Thermal models for the magmatic accretion and subsequent metamorphism of continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 46: 253-265.

WINDLEY, B.F. and SMITH, J.V. - 1976 - Archaean high grade complexes and modern continental margins. *Nature (London)*, 260: 671-675.

ZARTMAN, R.E. - 1969 - Lead isotopes in igneous rocks of the Grenville Province as a possible clue to the presence of older crust. *Geological Association of Canada, Special Paper*, 5: 193-205.

ZARTMAN, R.E. - 1974 - Lead isotopic provinces in the Cordillera of the Western United States and their geologic significance. *Economic Geology*, 69: 792-805.

ZINDLER, A., BROOKS, C., ARNDT, N.T. and HART, S.R. - 1978 - Nd and Sr isotope data from komatiitic and tholeiitic rocks of Munro Township, Ontario. In: *Short papers of the 4th International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology*. U.S.G.S. Open-File report, 78-701: 469-471.