



Geologia e Geoquímica da ilha de São Tomé e a "Linha Vulcânica dos Camarões"

Geology and Geochemistry of São Tomé Island and the "Cameroon Volcanic Line"

Rita Caldeira. ^{1,2}

¹ LNEG-Unidade de Geologia e Cartografia Geológica (rita.caldeira@lneg.pt)

² CeGUL – Centro de Geologia da Universidade de Lisboa

Resumo

A ilha de São Tomé está situada no sector oceânico do alinhamento vulcânico dos Camarões, cuja origem tem sido amplamente discutida mas é ainda objecto de controvérsia. Trabalhos de cartografia geológica realizados em São Tomé e a aquisição de novos dados geocronológicos permitiram estabelecer 4 unidades principais na vulcano-estratigrafia da ilha: Formação do ilhéu das Cabras (~13 Ma), Complexo Vulcânico de Mizambú (6-8 Ma), Complexo Vulcânico de Ribeira Afonso (2,5 a 5 Ma) e Complexo Vulcânico de São Tomé (< 1,5 Ma). Estas unidades abrangem lavas da série basalto alcalino – traquito – fonólito. O litótipo predominante é o basalto/basanito, mas os traquitos e fonólitos são frequentes, especialmente nas zonas SE e S da ilha. Algumas das lavas basálticas, principalmente as mais recentes da zona NE da ilha, contêm xenólitos máficos gabróicos e ultramáficos (Iherzolitos, harzburgites e dunitos), com características mineraloquímicas que indicam representar, respectivamente, fragmentos da crosta oceânica e resíduos mantélicos, subjacentes à ilha de São Tomé. As análises de rocha total confirmam o carácter alcalino das lavas, predominantemente sódico. Os padrões de terras raras e de elementos incompatíveis sustentam geração magmática por decrescentes graus de fusão parcial numa fonte mantélica com granada e anfíbola, enriquecida em elementos incompatíveis e de carácter não primordial e heterogéneo, e evolução magmática por cristalização fraccionada. As razões entre elementos traço e os padrões enriquecidos sugerem uma fonte resultante numa mistura dos componentes HIMU, EM I e DMM, com domínios possivelmente afectados por metassomatismo carbonatítico.

Palavras chave: São Tomé, vulcano-estratigrafia, geoquímica, basalto alcalino, xenólitos

Abstract

São Tomé Island is located on the oceanic sector of the Cameroon Volcanic Line which has been point of debate for years regarding its origin, however it is still controversial. Field work in São Tomé and new geochronologic data led to the definition of four main volcanostratigraphic units: Volcanic Formation of Cabras Islet (~13 Ma), Mizambú Volcanic Complex (6-8 Ma), Ribeira Afonso Volcanic Complex (2.5 a 5 Ma) and São Tomé Volcanic Complex (< 1.5 Ma). These units comprise lavas of the basalt - trachyte – phonolite series. The predominant lithotype is the basalt/basanite but trachytes and phonolites are frequently found especially at the south and southeast of the island. Mafic gabbroic and ultramafic (Iherzolites, harzburgites and dunites) xenoliths were found, particularly in recent basaltic lavas from the NE of the island. Their mineral chemistry supports, respectively, that they are oceanic crust fragments and mantle residues. Major element rock compositions support the lavas alkaline character, predominantly sodic. REE and incompatible trace element variation patterns are indicative of magmatogenesis by partial melting, decreasing in degree with time, of a garnet and amphibole bearing, heterogeneous and non primordial mantle source, and magmatic evolution by fractional crystallization. Trace element ratios and enrichment patterns suggest mixing between mantle components HIMU, EM I and DMM in the mantle source, with domains possibly affected by carbonatitic metasomatism.

Keywords: São Tomé, volcanostratigraphy, geochemistry, alkaline basalt, xenoliths

Introdução

A ilha de São Tomé constitui, com a ilha do Príncipe e alguns pequenos ilhéus, o arquipélago de São Tomé e Príncipe. Localiza-se no Golfo da Guiné, no troço oceânico do alinhamento vulcânico dos Camarões que se estende por 1600 km, desde o interior do continente africano a NE (planalto de Biu no NE da Nigéria - Monte Camarões na costa da África Ocidental) até à ilha de Pagalu (Ano-Bom) a SW (oceano Atlântico equatorial). A porção insular do alinhamento dos Camarões inclui, de NE para SW, a ilha de Bioko (Fernando Pó), na fronteira entre a litosfera oceânica e continental, e as ilhas de Príncipe, São Tomé e Pagalu edificadas sobre crosta oceânica (< 130 Ma). Os diversos centros vulcânicos reflectem actividade magmática em região intraplaca oceânica, desde há 30 Ma (Ilha do Príncipe) até um período recente (pré-histórico), não mostrando evidência consistente com migração espacial da actividade vulcânica com o tempo (Fitton & Dunlop, 1985). A "Linha Vulcânica dos Camarões" (LCM) tem sido considerada uma área privilegiada para a comparação entre o vulcanismo intraplaca oceânico e continental e muitos dos estudos geoquímicos efectuados vão de encontro a esse objectivo. Outra fonte de discussão está centrada na definição de modelos de dinâmica mantélica que expliquem a origem do magmatismo ao longo da LCM a qual tem sido objecto de alguma contradição e muita controvérsia (Fitton, 1980, 1983; Moreau *et al.*, 1987; Halliday *et al.*, 1988, 1990; Deruelle *et al.*, 1991, 2007; Deruelle, 1994; Lee *et al.*, 1994; Meyers *et al.*, 1998).

A investigação geológica, petrológica, mineraloquímica e geoquímica da ilha de São Tomé que foi realizada desde 1994 e que aqui se descreve sucintamente decorreu da elaboração da Carta Geológica de São Tomé, na escala 1: 25 000 (Munhá *et al.*, 2006), efectuada no âmbito de uma acção de cooperação solicitada pelo Governo da República Democrática de São Tomé e Príncipe a Portugal, que envolveu o Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT), o Departamento e o Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (GeoFCUL e CeGUL) e a Direcção de Recursos Naturais e Energia (DRNE) de São Tomé e Príncipe, contando com o apoio financeiro do Instituto Português de Apoio ao Desenvolvimento (IPAD). A aquisição de dados vulcano-estratigráficos permitiu efectuar estudos petrológicos e geoquímicos numa nova perspectiva, apoiada em ciclos vulcânicos, tendo em vista uma melhor compreensão da evolução do magmatismo local e do manto oceânico subjacente à ilha de São Tomé e, assim, contribuir para a discussão sobre a génese da LCM.

Vulcano-estratigrafia

Os trabalhos de cartografia geológica na ilha de São Tomé, juntamente com a obtenção de novos dados geocronológicos levaram à definição da sequência vulcano-estratigráfica da ilha com 4 unidades (Munhá *et al.*, 2006, 2007): a Formação vulcânica do ilhéu das Cabras, o Complexo Vulcânico de Mizambú (CMZ), o Complexo Vulcânico de Ribeira Afonso (CRA) e o Complexo Vulcânico de São Tomé (CST). Paralelamente, foram assinalados xenólitos máficos gabróicos e ultramáficos, especialmente em lavas basálticas recentes da zona NE da ilha.

A *Formação Vulcânica do Ilhéu das Cabras* (~13 Ma, Fitton & Dunlop, 1985) representa o vestígio mais antigo do vulcanismo responsável pela edificação da ilha. Constitui o ilhéu das Cabras (a NE da ilha de S. Tomé) o qual é composto por relevos traquíticos que representam uma ou duas chaminés vulcânicas exumadas pela erosão, alinhados na direcção (NE – SW). Os materiais traquíticos, muito alterados, apresentam estrutura maciça cortada por uma densa rede de fracturas. Os afloramentos que constituem o ilhéu elevam-se da plataforma de abrasão pouco profunda com relevos de erosão diferencial, em resultado da estrutura maciça e composição ácida da rocha.

O *Complexo Vulcânico de Mizambú* (6-8 Ma; Fitton & Dunlop, 1985; Caldeira *et al.*, 2003) está representado pelos edifícios vulcânicos do tipo central de Mizambú e Micondó, no Centro e sul da ilha. É constituído por chaminés e pequenos derrames traquíticos a fonolíticos a que estão associados derrames subaéreos basálticos a tefríticos, com intercalações de depósitos de *lahar*, derrames e piroclastos basálticos submarinos. Os derrames basálticos estão cortados por uma rede filoniana tefrítica a traquítica que aumenta de densidade com a proximidade ao edifício principal, onde predominam os diques de composição traquítica e podem conter xenólitos peridotíticos.

O *Complexo Vulcânico de Ribeira Afonso* (2,5 - 5 Ma: Fitton, 1987; Fitton & Dunlop, 1985; Halliday *et al.*, 1988; Caldeira *et al.*, 2003) constitui grande parte das zonas SE e S da ilha, e uma pequena área na zona NE da ilha. Está representado por edifícios vulcânicos centrais muito

destruídos pela erosão, de onde se destacam chaminés fonolíticas descarnadas (e.g. Cão Grande, Maria Fernandes, S. João e Sinai). A estas rochas estão associadas escoadas basálticas (basaltos alcalinos a tefritos) que na costa SE apresentam características submarinas e derrames de lavas félsicas com composição traquítica e fonolítica. Quer as lavas subaéreas quer as submarinas são cortadas por diques de orientação predominante N60W. A SW, material piroclástico do tipo *block and ash flow* evidencia actividade vulcânica explosiva ligada ao centro vulcânico do Cão Pequeno. A rede filoniana que corta o CRA bem como as crostas lateríticas que sobre ele se desenvolveram constituem os principais critérios de separação estratigráfica relativamente ao CST.

O *Complexo Vulcânico de S. Tomé* é a unidade vulcânica mais recente (<1,5 Ma: Fitton & Dunlop, 1985; Halliday et al., 1988; Munhá et al., 2002; Caldeira et al., 2003) e abrange quase toda a zona norte e o extremo sul da ilha. A fase mais antiga deste complexo tem carácter quimicamente evoluído e pouca expressão volumétrica, traduzindo-se apenas em dois domos traquíticos (S. José e OqueBóbó) que se encontram bastante alterados. A principal fase vulcânica deste Complexo terá ocorrido no último milhão de anos e está representada, nas regiões NW e NNW, por espessos derrames subaéreos basálticos a traquibasálticos e traquifonolíticos, e piroclastos basálticos, relacionados com vulcanismo do tipo fissural, que estão por vezes intercalados com depósitos de vertente e de lahar que separando uma sequência inferior de outra superior. No litoral N e NW da ilha existem sequências submarinas, por vezes espessas, constituídas por lavas em almofada e piroclastos submarinos, sobrepostas ou ladeadas por produtos lávicos subaéreos. Nas regiões E e NE este complexo está representado por cones havaianos/estrombolianos parcialmente erodidos (e.g. Vila Braga, Vista Alegre, Santa Adelaide, Mongo, Macaco, Vila Amélia e Sameiro) a que estão associados derrames e coberturas de piroclastos subaéreos.

Os últimos vestígios de actividade vulcânica (< 0,4 Ma, Halliday et al., 1988; Munhá et al., 2002) encontram-se no NE (e.g. Sacli, Muquinqui, S. Pedro, Carregado, Vermelho) e extremo sul da ilha (Lama-Porco, S. Francisco e ilhéu das Rolas) em cones piroclásticos bem preservados, por vezes com estratificação rítmica, a que estão associados derrames basálticos. Esta unidade vulcânica está relacionada com nascentes de água gaso-carbónica, que definem alinhamentos NE-SW e NNE-SSW.

Petrografia / Química Mineral

A análise petrográfica das rochas de São Tomé mostra tipos petrográficos típicos duma séria alcalina que no seu todo variam de basalto alcalino/basanito, traquibasalto, traquito até fonólito, com predomínio dos termos basálticos. Apesar de não haver grandes diferenças para o mesmo tipo litológico entre os diversos complexos, no CST existe uma continuidade de tipos, desde o basalto alcalino ao traquifonolito passando pelos termos intermédios traquibasálticos, enquanto que nos CRA e CMZ estes estão em falta. Dentro de cada unidade existe pois uma gama petrográfica a que corresponde também uma gama composicional desde termos basálticos mais ou menos primitivos até termos evoluídos, como os fonólitos.

Duma maneira geral, são rochas porfíricas com predominância de fenocristais de olivina ($87 - 68 \% \text{Fo}_{\text{N-B}}$), por vezes com inclusões de espinela cromífera ($\text{Cr}\# = 0,22 - 0,46$, $\text{Mg}\# = 0,38 - 0,62$), e clinopiroxena ($\text{Wo}_{47}\text{En}_{45}\text{Fs}_8 - \text{Wo}_{51}\text{En}_{33}\text{Fs}_{16}$) nas rochas basálticas e de feldspato alcalino (e.g. $\text{Ab}_{42}\text{Or}_{55} - \text{Ab}_{68}\text{Or}_{28}$), feldspatóide, clinopiroxena do tipo aegirina-augite ($\text{Wo}_{48}\text{En}_{24}\text{Fs}_{28} - \text{Wo}_{23}\text{En}_{1}\text{Fs}_{76}$), por vezes com núcleos diopsídicos ($\text{Wo}_{50}\text{En}_{34}\text{Fs}_{16}$), anfíbola e esporadicamente plagioclase ($\% \text{An} = 39 - 25$) nas rochas traquifonolíticas. A matriz apresenta, em percentagens variáveis, cristais de olivina ($\% \text{Fo} = 61 - 81$), Ti-magnetite, clinopiroxena ($\text{Wo}_{47}\text{En}_{45}\text{Fs}_8 - \text{Wo}_{51}\text{En}_{33}\text{Fs}_{16}$), plagioclase ($\% \text{An} = 35 - 69$), feldspatóides e vidro (abundante nas rochas submarinas) nas rochas basálticas e de feldspato, feldspatóides, aegirina-augite e óxidos de Fe-Ti, nas rochas traquifonolíticas.

A petrografia e a química mineral evidenciam a importância da cristalização fraccionada no processo de evolução magmática. As variações químicas núcleo – bordo verificadas em muitos fenocristais e entre estes e os cristais da matriz são bem demonstrativos desse facto [e.g. $\% \text{Fo}_{\text{olivina}(\text{n-b-m})} = 84 - 73 - 60$].

Alguns basaltos alcalinos e basanitos, principalmente do CST mas também do CMZ contêm nódulos peridotíticos e gabróicos.

Os estudos petrográficos dos nódulos ultramáficos indicam predominância de peridotitos que, consoante as percentagens relativas de olivina, ortopiroxena e clinopiroxena, foram classificados como lherzolitos, harzburgitos ou dunitos. Foram também identificados piroxenitos, mais escassos, que se classificaram como ortopiroxenitos ou clinopiroxenitos consoante a piroxena predominante era ortorrômbica ou monoclinica.

As texturas dos peridotitos variam de alotriomórficas granulares a porfiroclásticas com evidências de terem sofrido tectonização e recristalização, com excepção de alguns piroxenitos que mostraram textura granular sem deformação.

Os encraves gabróicos apresentam texturas essencialmente granulares, por vezes bastante deformadas, revelando graus de deformação mais ou menos intensa. A mineralogia reflecte de forma variável a presença de plagioclase, olivina, clinopiroxena e espinela verde. Um dos encraves apresenta ortopiroxena.

A química mineral indica uma origem accidental quer para os peridotitos, quer para os nódulos gabróicos, quer ainda para alguns piroxenitos.

Nos peridotitos, a olivina rica em forsterite ($Fo > 89\%$) e níquel ($NiO > 0,35\%$) e pobre em cálcio ($CaO < 0,10$, indicando condições em ambiente mantélico de alta pressão), a correlação do $Mg\#$ ($= 91 - 95$) da ortopiroxena com o Fo da olivina e a correlação inversa do Al_2O_3 da ortopiroxena com o $Cr\#$ da espinela coexistente, bem como o baixo Ti da clinopiroxena (cristais primários: $TiO_2 < 0,06\%$) e da espinela ($TiO_2 < 0,1\%$), indiciam origem mantélica residual. A abundância de inclusões fluidas e a ocorrência de alguns carbonatos levam-nos a pensar que terão sido afectados por fluidos metassomáticos ricos em CO_2 . Os piroxenitos correspondem a cumulados relacionados com processos de separação cristal/líquido relacionados com os magmas que deram origem aos basaltos hospedeiros ou com um episódio magmático anterior.

A química mineral dos nódulos gabróicos é consistente com um carácter não alcalino. Destacam-se os baixos teores em alumínio e titânio das clinopiroxenas que indicam afinidades toleíticas; o baixo TiO_2 ($< 0,16\%$) das espinelas; e os elevados teores de An ($76 - 96\%$) e baixo Or ($< 0,8\%$) das plagioclases, idênticos ao carácter extremamente empobrecido em potássio ($K_2O < 0,10\%$) das plagioclases dos toleitos das cristas oceânicas. Estas características e a coexistência de clinopiroxena e ortopiroxena em pelo menos um dos nódulos, sugerem que possam representar fragmentos da crosta oceânica subjacente à ilha de São Tomé.

Os cálculos geotermométricos para os xenólitos, realizados com base na composição de minerais em equilíbrio indicam um processo de evolução complexo, com reequilíbrio com a geotérmica oceânica estável (até aos $650^\circ C$) e um aquecimento final (até cerca dos $1200^\circ C$) provocado pela inclusão dos xenólitos no magma em ascensão (Caldeira e Munhá, 2002).

Geoquímica

As rochas da ilha de São Tomé apresentam uma variabilidade química que pode ser resumida na gama de valores de $Mg\#$ de 5 a 73 e de SiO_2 de 41 a 67 %, demonstrativa de que representam não só rochas com composições próximas de líquidos primários e/ou primitivos mas, também, resultantes de processos de evolução magmática. A geoquímica elementar suporta o carácter alcalino, subsaturado das lavas de São Tomé, com as rochas basálticas a apresentarem valores elevados de alcalis/silica ($0,05 - 0,12$) e de MgO ($\bar{x} = 10,52 \pm 1,74\%$) além de carácter sódico predominante Na_2O/K_2O ($\bar{x} = 1,67 \pm 1,01$). Nas lavas consideradas de composição primitiva ($Mg\# > 57$ e $Ni > 170$ ppm) as razões Al_2O_3/TiO_2 ($2,91 - 4,93$; $\bar{x} = 3,90 \pm 0,44$) e CaO/TiO_2 ($2,71 - 3,61$; $\bar{x} = 3,27 \pm 0,23$) são claramente inferiores aos valores condríticos ($18,5$ to $22,4$ e $16,1$ to $20,7$ respectivamente), enquanto a razão Al_2O_3/CaO ($1,01 - 1,40$; $\bar{x} = 1,19 \pm 0,11$) apresenta valores similares ou ligeiramente superiores aos condríticos ($1,08$ a $1,16$, Clague & Frey, 1982) sugerindo enriquecimento em Ti na fonte mantélica de São Tomé.

Os padrões de distribuição das terras raras (REE) fortemente enriquecidos (80 a 400 x condritos nas LREE e 6 a 21 x condritos nas HREE). Comparando os padrões para os três principais complexos verifica-se uma correlação inversa entre a idade destes e o grau de enriquecimento Estes valores reflectem a forte fraccionação das LREE relativamente às HREE ($(La/Yb)_N = 16,01 - 31,95$) e às terras raras médias (MREE) ($(La/Sm)_N = 2,97$ to $4,35$). Estes factos juntamente com a correlação inversa verificada entre a razão La/Yb e o La , assim como os baixos teores de Yb e Lu , são indicativos de processos de baixos graus de fusão em

equilíbrio com a granada na fonte mantélica. A anomalia negativa de K no padrão de elementos incompatíveis está relacionada com uma fase residual mantélica rica naquele elemento (flogopite ou anfíbola). Uma vez que $D_K^{anf} > D_{Rb}^{anf}$; $D_{Rb}^{Flog} > D_{Rb}^{anf}$; $D_{Sr}^{anf} > D_{Sr}^{Flog}$ e $D_{Sr}^{anf} < D_{Ba}^{anf}$, e os diagramas binários Rb vs. K e Ba vs. Sr mostram menor incompatibilidade do K e do Sr relativamente ao Rb e Ba nas análises dos basaltos primitivos de São Tomé, conclui-se que a anfíbola é a fase residual rica em K mais provável.

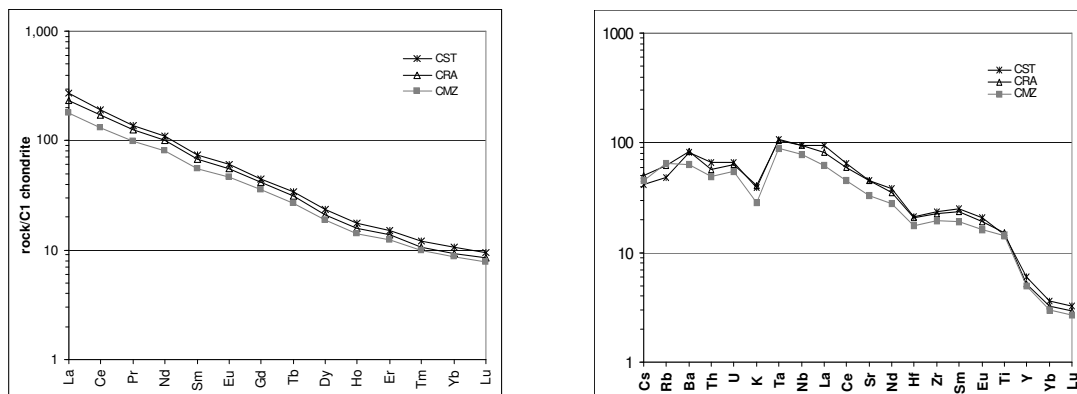


Fig. 1 – Padrões de distribuição das terras raras (REE) normalizadas em relação aos condritos (McDonough & Sun, 1995) e dos elementos incompatíveis normalizados em relação ao manto primordial (Sun & McDonough, 1989) considerando os valores médios para cada complexo vulcânico.

Os padrões de distribuição de elementos incompatíveis normalizados em relação ao manto primordial mostram, também, um panorama geral de enriquecimento que aumenta com o decréscimo de idade dos Complexos. É verificado que os elementos HSF, Nb e Ta, estão enriquecidos relativamente aos LILE e aos elementos Th e U (HSF mais incompatíveis) o que é normalmente associado a uma contribuição do componente HIMU para a fonte mantélica (Weaver, 1991). Por outro lado, os valores das razões LREE/HFSE e LILE/HFSE superiores ao normalmente conotado com o componente HIMU indicam que, além dos componentes DMM e HIMU, também o componente EMI, contribuiu para a fonte mantélica de São Tomé. Ainda, os valores bastante constantes da razão Ce/La ($= 0,55 \pm 0,02$; $R=0,989$), que podem ser considerados como representativos da fonte mantélica, são superiores aos do manto primordial indicando um carácter não primordial para fonte mantélica.

A geração de magmas alcalinos, subsaturados, com o tipo de enriquecimento em elementos incompatíveis observado nos magmas de São Tomé está normalmente associada a baixos graus de fusão parcial. A estimativa das percentagens de fusão, baseada na distribuição do Yb e Th, aplicada a magmas com composição primária ($Mg\# > 68$, $Ni > 250$ ppm; Frey et al., 1978) dos diferentes Complexos vulcânicos de São Tomé, suportam uma diminuição dos graus de fusão desde 17 % no CMZ, 11 % no CRA até 7 % no CST, de acordo com as conclusões análise dos padrões de variação das terras raras e dos outros elementos traço. Os valores elevados de $\Delta \log(fO_2)_{FMQ}$ [$= 1,0$ to $3,4$] estimados para os magmas primitivos de São Tomé reflectem a natureza oxidada da fonte magmática astenosférica.

Cálculos geotermobarométricos indicam geração magmática a temperaturas de 1364 a 1517 °C e profundidades de 84 a 112 km e sugerem episódios provocadores dum aumento de fugacidade do oxigénio não directamente relacionados com a fonte, possivelmente associados à circulação de fluidos metassomáticos.

Agradecimentos

As ideias aqui expostas resultaram dum trabalho de equipa que além da autora incluiu os colegas José Munhá, José Madeira, João Mata e Rui Afonso. Foram realizados no âmbito dos projectos "Geologia do Arquipélago de S. Tomé e Príncipe [IICT / GeoFCUL e CeGUL / IPAD - Portugal e DRNE - S. Tomé e Príncipe]" e POCA-PETROLOG (Centro Geologia F.C. U. Lisboa, UI: 263; POCTI - FEDER).

Referências

- Caldeira, R. & Munhá, J. M. (2002) - "Petrology of ultramafic xenoliths from São Tomé Island, Cameroon Volcanic Line (Oceanic Sector). *Journal of African Earth Sciences* V.34, 3-4, 231-246.
- Caldeira, R., Madeira, J., Munhá, J.M., Afonso, R.S., Mata, J., Tassinari, C.C., & Nascimento, E. (2003) Caracterização das principais unidades vulcano-estratigráficas da ilha de São Tomé, Golfo da Guiné". *Ciências da Terra*, (Univ. Nova de Lisboa), nº esp. V: A15-A18.
- Déruelle, B. (1994) Le magmatisme de la "Ligne du Cameroun": Le bilan positif des deux dernières décennies de coopération franco-camerounaise. *Pangea, Conference Spécialisée*: 30-36.
- Déruelle, B.; Moreau, C.; Nkoumbou, C.; Kambou, R.; Lissom, J.; Njonfang, E.; Ghogomu, R.T. & Nono, A. (1991) The Cameroon Line: A review. In: *Magmatism in extensional structural settings. The Phanerozoic african plate* (Kampuru, A.B.; Lubala, R.T. eds.) Springer, Berlin, 274-327.
- Déruelle, B.; Ngounouno, I. & DeMaiffe, D. (2007) The Cameroun Hot Line (CHL): A unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres. *C. R. Geosciences* 339: 589-600.
- Fitton, J.G. (1980) The Benue through and Cameroun line - a migrating rift system in West Africa. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 51: 132-138.
- Fitton, J.G. (1983) Active versus continental rifting: evidence from the West African rift system. *Tectonophysics* 94: 473-481.
- Fitton, J.G. (1987) The Cameroon line, West Africa: a comparison between oceanic and continental alkaline volcanism. In *Alkaline Igneous Rocks* (Fitton, J.G. & Upton, B.G.J. eds), *Geol. Soc. Spec. Publ.* 30: 273-291.
- Fitton, J.G. & Dunlop, H.M (1985) The Cameroon line, West Africa and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 72: 23-38.
- Frey, F.A.; Green, D.H. & Roy, S.D. (1978) – Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19, 463-513.
- Halliday, A.N.; Dickin, A.P.; Fallick, A.E. & Fitton, J.G. (1988) Mantle dynamics: A Nd, Sr, Pb and O isotopic study of the Cameroon line volcanic chain. *Journal of Petrology* 29: 181-211.
- Halliday, A.N.; Davidson, J.P.; Holden, P.; Dewolf, C.D.; Lee, D.-C. & Fitton, J.G. (1990) Trace-element fractionation in plumes and the origin of HIMU mantle beneath the Cameroon line. *Nature* 347: 523-528.
- Lee, D.-C.; Halliday, A.N.; Fitton, J.G; & Poli, G. (1994) Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon line: evidence for a mantle plume origin. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 123: 119-138.
- McDonough, W.F. & Sun, S.-S. (1995) – The composition of the earth. *Chem. Geol.*, 120: 223-253.
- Meyers, J.B.; Rosendahl, B.R.; Harrison, C.G.A. & Ding, Z.-D. (1998) Deep-imaging seismic and gravity results from the offshore Cameroon Volcanic Line, and speculation of African hotlines. *Tectonophysics* 284: 31-63.
- Moreau, C.; Regnault, J.-M.; Deruelle, B. & Robineau, B. (1987) A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa. *Tectonophysics* 139: 317-334.
- Munhá, J. M.; Afonso, R. S.; Caldeira, R. & Mata, J. (2002) Estudo Geológico Preliminar da Região Nordeste da ilha de São Tomé (folha nº 2 - Ana Chaves). *Garcia de Orta (Série de Geologia)* 18(1-2): 1-8.
- Munhá, J., Caldeira, R.; Madeira, J.; Afonso, R. Mata, J.; Nascimento, E. & Paquete, L. (2006) – Carta Geológica da ilha de São Tomé. Escala 1: 25 000. Folhas 1, 2, 4 e 5. Ed. IICT/IPAD.
- Munhá, J., Caldeira, R., Madeira, J., Mata, J. & Afonso, R (2007) – Geologia da ilha de São Tomé. Notícia explicativa da Carta Geológica, na escala 1:25 000. Ed. IPAD, Lisboa, 41p.
- Sun, S.S. & McDonough, W.F. (1989) – Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: *Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds) – Magmatism in the ocean basins*, *Geological Society Spec. Publ.*, 42: 313-345.
- Weaver, B.L. (1991) The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 104, 381-397.