

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Petrology of the Eocene alkaline volcanism from the western Rio Grande Rise,
South Atlantic Ocean**

JÚLIA TACIRO MANDACARÚ GUERRA

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Geociências
(Mineralogia e Petrologia) para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Petrologia Ígnea e
Metamórfica

Orientador: Valdecir de Assis Janasi

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Guerra, Júlia Taciro Mandacarú
Petrology of the Eocene alkaline volcanism from
the western Rio Grande Rise, South Atlantic Ocean /
Júlia Taciro Mandacarú Guerra; orientador Valdecir
de Assis Janasi. -- São Paulo, 2023.
183 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Mineralogia e Petrologia) -- Instituto de
Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. Elevação do Rio Grande. 2. Vulcanismo
alcalino. 3. Petrologia ígnea. 4. Química mineral. 5.
Oceano Atlântico Sul. I. Janasi, Valdecir de Assis,
orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Petrology of the Eocene alkaline volcanism from the
western Rio Grande Rise, South Atlantic Ocean**

JÚLIA TACIRO MANDACARU GUERRA

Orientador: Prof. Dr. Valdecir Assis Janasi

Dissertação de Mestrado

Nº 897

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Valdecir Assis Janasi

Dr. Anderson Costa dos Santos

Dra. Vydiã Vieira de Almeida

SÃO PAULO
2023

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, eu gostaria de agradecer ao Prof. Luigi Jovane por gentilmente ceder as amostras que foram estudadas e apoiar o nosso trabalho. Agradeço também toda ajuda dos demais integrantes do grupo do Instituto Oceanográfico, principalmente do Muhammad e do Priyeshu. Obrigada pela confiança. Preciso também agradecer muito ao Valdecir por confiar em mim para trabalhar com amostras tão preciosas. Obrigada pela paciência, por ser tão solícito, por me acalmar quando eu preciso e por me ensinar tanto.

Eu devo todo meu amor pela ciência e pela natureza aos meus pais tão queridos, que sempre incentivaram minha curiosidade e me mostraram a importância de buscar o caminho que eu amo. Obrigada por tudo. Preciso agradecer também ao Gabriel, que além de escutar todos meus desabafos e me ajudar com alguns programas de edição de imagens, me fez companhia junto com os gatos até eu finalmente submeter a minha dissertação. Agradeço a todo o resto da família pelo apoio também. Obrigada Raul por me ouvir por horas divagando sobre geologia mesmo sem entender quase nada e por sempre estar disposto a me ajudar.

Trabalhar nos últimos três anos de pandemia não foi fácil, e algumas pessoas fizeram toda a diferença não só pelo apoio durante as análises, mas também pelo incentivo. Quero agradecer muito ao Basei pelas conversas e por todo o auxílio na parte das datações. Ao Fábio, pela ajuda com as análises de DRX. À Lucelene, por todo o incentivo e ajuda com a preparação de amostras e com as análises de microssonda. Obrigada Adriana por me acompanhar por um tempinho durante as análises de laser e por compartilhar tanto conhecimento em suas aulas. Uma das coisas que eu mais gosto de fazer no IGc é olhar minhas lâminas na sala 108 e aproveitar para jogar uma conversa fora, e meus maiores companheiros de 108 são os queridos professores de metamórfica. Obrigada, Gergely, Renato e Fred. Aos companheiros frequentes de almoço, por tantos cafezinhos e boas conversas. Obrigada também ao pessoal do LCT, que sempre foram mais meus amigos do que colegas de trabalho, e que sempre me ajudam com as análises de MEV.

Obrigada a todos os grandes amigos que fizeram parte dessa jornada de uma forma direta ou indireta. Obrigada Bárbara, pela ajuda durante as análises no SHRIMP. Obrigada a todos os outros colegas que me ajudaram seja discutindo algum assunto geológico ou curtindo uma boa conversa para relaxar um pouco. São muitas pessoas e eu com certeza vou esquecer de alguém, mas obrigada Natasha, Lucas, Foflete, Melina, Fernanda, Luis, Thiago, Isa, Caio, Juan, Lu, todo mundo!

Também quero dedicar este trabalho a todos os professores que fizeram parte da minha formação na escola, na graduação e na pós. Na pós-graduação, uma das matérias que mais me marcou foi a sobre rochas alcalinas. Obrigada Rogério e Gaston por compartilharem tanto conhecimento comigo e com os outros alunos. Também tive a oportunidade de fazer matérias online na UERJ devido à pandemia, e gostaria de agradecer ao Prof. Anderson. A dedicação de vocês fez de mim uma cientista melhor.

Obrigada a todos os funcionários e técnicos que permitiram que eu desse andamento aos meus estudos no IGc-USP e na UNESP também. Um agradecimento especial ao George Luvizoto e ao Daniel, que ajudaram muito com as análises de microssonda na UNESP, e à Profa. Lucelene novamente, por me ceder tempo para as análises e pela companhia. Um agradecimento especial também para o Vinícius por toda a ajuda. Obrigada Katherine e Claudio por todo o suporte dado nesse momento crítico de entrega de dissertação.

Por fim, eu gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processos nº 2020/01356-7 e 2019/22084-8,) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo nº 130249/2020-3) pelo apoio financeiro à minha pesquisa.

RESUMO

A Elevação do Rio Grande (ERG) é uma feição batimétrica importante do Oceano Atlântico Sul. Considera-se amplamente que sua origem se deu junto com a Cadeia de Walvis em um centro de espalhamento sob influência de uma pluma mantélica. Apesar do seu potencial para esclarecer aspectos importantes da evolução tectono-magmática complexa dos dois platôs no contexto da abertura do Oceano Atlântico Sul, a ERG foi investigada por um número consideravelmente menor de estudos petrológicos do que a Cadeia de Walvis e a Província Guyot. Este estudo focado no vulcanismo de afinidade alcalina da porção oeste da Elevação do Rio Grande teve como objetivo principal a investigação do seu sistema magmático por meio da caracterização detalhada de rochas porfiríticas como basaltos alcalinos, um picro-basalto, um basanito, traquiandesitos e traquitos dragados dessa região. A integração dos resultados de análises geoquímicas de rocha total, petrografia e química mineral (especialmente as análises texturais e compositionais de clinopiroxênios) sugere um sistema magmático transcrustal polibárico complexo com múltiplos episódios de recarga de magmas, cuja evolução é fortemente controlada por cristalização fracionada. Uma idade de 46.86 ± 0.33 Ma foi obtida por datação U-Pb de zircões e reforça a importância do magmatismo alcalino do Eoceno na porção oeste da Elevação do Rio Grande. Por fim, análises isotópicas de Pb, Sr e Nd evidenciam que as assinaturas das rochas investigadas são similares às de lavas do tipo Gough encontradas ao longo da Cadeia de Walvis, Província Guyot e ilha de Gough, o que sugere que suas fontes mantélicas possuíam características em comum mesmo depois da separação dos dois platôs oceânicos.

PALAVRAS-CHAVE: Elevação do Rio Grande, Vulcanismo alcalino, Petrologia ígnea, Química Mineral, Geoquímica, Oceano Atlântico Sul

ABSTRACT

The Rio Grande Rise (RGR) is an important bathymetric feature in the South Atlantic Ocean. It is widely accepted that it was formed together with the Walvis Ridge at a plume-influenced spreading centre. Despite its potential to clarify the complex tectono-magmatic evolution of both plateaus in the context of the opening of the South Atlantic Ocean, the RGR has been subject to a much lower number of petrological studies, as compared to the Walvis Ridge and Guyot Province. This study focused on the alkaline affinity volcanism from the western Rio Grande Rise aimed at the investigation of its magmatic system through detailed characterization of dredged porphyritic alkali-basalts, a picro-basalt, a basanite, trachyandesites and trachytes. The integrated results of whole-rock geochemistry, petrography, and mineral chemistry (specially clinopyroxene textural and compositional analysis) suggest a complex polybaric transcrustal magmatic system with multiple episodes of magma recharge and evolution strongly controlled by fractional crystallization. Zircon U-Pb dating of a single trachyte sample yielded an age of 46.86 ± 0.33 Ma which reinforces the importance of the western RGR Eocene alkaline magmatism. Pb, Sr and Nd isotope analysis evidence that the signatures of the investigated volcanic rocks are similar to those from EMI flavoured Gough-type lavas from the Walvis Ridge, Guyot Province and Gough Island, what suggests that their mantle sources had common characteristics even after both oceanic plateaus were separated from each other.

KEYWORDS: Rio Grande Rise, Alkaline volcanism, Igneous Petrology, Mineral Chemistry, Geochemistry, South Atlantic Ocean

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Geomorfologia da Elevação do Rio Grande e relação com a Cadeia de Walvis.....	2
2.2 Rochas vulcânicas da Elevação do Rio Grande	5
2.2.1 Basaltos toleíticos	5
2.2.2 Rochas vulcânicas alcalinas eocênicas.....	6
2.3 A origem dos basaltos de ilhas oceânicas e a significância das assinaturas isotópicas <i>Enriched Mantle I</i> em lavas do Atlântico Sul	8
2.4 Possível presença de remanescentes continentais na Elevação do Rio Grande	12
3 METODOLOGIA.....	13
3.1 Petrografia e Microscopia Eletrônica de Varredura	14
3.2 Geoquímica de rocha total.....	14
3.3 Análises de química mineral	15
3.4 Difração de Raios X	15
3.5 Datação U-Pb.....	16
3.6 Isotopia de Pb, Sr e Nd	16
4 RESULTADOS	17
4.1 Petrografia.....	17
4.2 Geoquímica de rocha total.....	22
4.3 Química Mineral	27
4.3.1 Clinopiroxênio.....	27
4.3.2 Feldspato.....	43
4.3.3 Outros minerais	46
4.4 Datação U-Pb.....	49
4.5 Isotopia de Pb, Sr e Nd	50
5 DISCUSSÃO	53
5.1 Termobarometria	53
5.2 Evidências de um sistema magmático complexo.....	63
5.3 Isotopia de Pb, Sr e Nd e implicações para a origem do vulcanismo alcalino da Elevação do Rio Grande	68
6 Conclusões e perspectivas futuras	72
7 REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE	85

1 INTRODUÇÃO

A Elevação do Rio Grande (ERG) é uma das feições batimétricas de maior destaque no Oceano Atlântico Sul, e possui uma topografia significativamente mais rasa do que o assoalho oceânico ao seu redor. Ela está localizada a aproximadamente 1000 km da costa brasileira, entre 28° e 40°W e 28° e 36°S (Gamboa e Rabinowitz, 1984; Jovane et al., 2019).

Por se tratar de uma região submersa e possuir localização remota, a geologia da ERG não é conhecida em detalhes por conta da dificuldade de amostragem de suas rochas. A maioria dos estudos publicados sobre o platô se baseiam em análises e interpretações de dados geofísicos e amostras do *Deep Sea Drilling Project* (DSDP) Leg 39 (Sítio 357; Perch-Nielsen et al., 1977) e Leg 72 (Sítio 516; Barker et al., 1983), que recuperaram principalmente rochas sedimentares e intervalos subordinados de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas (e.g., Fodor e Thiede, 1977; Gamboa e Rabinowitz, 1984; Graça et al., 2019; Praxedes et al., 2019).

Dentre as rochas vulcânicas recuperadas na região, existem os basaltos toleíticos de ~80-88 Ma que constituem o embasamento perfurado pelo DSDP no Sítio 516F (Musset e Barker, 1983; Thompson et al., 1983; O'Connor e Duncan, 1990; Rohde et al., 2013b), e as rochas de afinidade alcalina de ~46 Ma associadas com os montes submarinos e guyots abundantes principalmente na porção oeste da elevação (Fodor et al., 1977; Fodor e Thiede, 1977; Bryan e Duncan, 1983; Gamboa e Rabinowitz, 1984; Rohde et al., 2013b; Hoyer et al., 2022a, b).

A Elevação do Rio Grande é considerada uma *Large Igneous Province* em uma região atualmente assísmica, e a hipótese mais aceita na literatura para explicar sua morfologia e batimetria anômala sugere que a crosta oceânica se tornou regionalmente mais espessa devido à interação entre magmatismo na Dorsal Meso-Atlântica e uma pluma mantélica, em uma situação análoga à da Islândia (Gamboa e Rabinowitz, 1984; O'Connor e Duncan, 1990; Rohde et al., 2013b; Graça et al., 2019). Entretanto, sua origem complexa ainda é debatida por estudos recentes que discutem a possível existência de material continental *in situ* na região e a gênese de suas rochas vulcânicas alcalinas (Graça et al., 2019; Jovane et al., 2019; Santos et al., 2019; Hoyer et al., 2022a).

Apesar da sua importância para a formação e evolução da ERG, a petrologia do seu vulcanismo alcalino não foi o foco de muitos estudos até agora. Algumas

exceções incluem o trabalho de Fodor e Thiede, (1977), que caracterizaram uma brecha vulcânica recuperada pelo DSDP no Sítio 357, o estudo de Fodor et al. (1977), que investigou a petrologia de 6 amostras vulcânicas alcalinas dragadas, e o trabalho recente de Hoyer et al. (2022a, b), que esclarece as diferenças compositionais entre as rochas vulcânicas dragadas das porções oeste e leste da Elevação do Rio Grande, comparando-as também com amostras da cadeia de montes submarinos Jean Charcot.

Essa dissertação reporta os resultados de um estudo integrado de rochas vulcânicas alcalinas dragadas da porção oeste da Elevação do Rio Grande pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (Jovane et al., 2019), incluindo petrografia, análises de química mineral (microssonda eletrônica e LA-ICP-MS), geoquímica de rocha total, isotopia de Sr, Nd e Pb, e datação U-Pb. O principal objetivo desse trabalho foi investigar a evolução magmática dessas rochas vulcânicas por meio de sua caracterização detalhada, focando no potencial que as análises de química mineral possuem para fornecer informações sobre o sistema magmático.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esse trabalho investigou rochas de afinidade alcalina dragadas da porção oeste da Elevação do Rio Grande pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Essas rochas, que incluem basaltos alcalinos, um picro-basalto, um basanito, um traquibasalto, traquianedesitos e traquitos, foram caracterizadas detalhadamente integrando análises petrográficas, geoquímica de rocha total, química mineral e isotopia de Sr, Nd e Pb. Além disso, foi feita uma datação U-Pb de zircões de uma amostra de traquito.

A idade U-Pb de 46.86 ± 0.33 Ma obtida é coerente com as previamente reportadas na literatura e reforça a importância do vulcanismo alcalino eocênico na porção oeste da Elevação do Rio Grande. A datação de um número maior de amostras dragadas de diferentes áreas do platô poderia esclarecer aspectos da evolução tectono-magmática da ERG e sua possível relação com o vulcanismo alcalino ao longo da cadeia de montes submarinos Jean Charcot e no Alto do Cabo Frio.

A caracterização mineralógica mostra que algumas das rochas estudadas são classificadas erroneamente como tefrifonolitos e fonolitos de acordo com os diagramas TAS e de Zr/Ti versus Nb/Y. Portanto, os traquitos são as rochas mais evoluídas da suíte de amostras analisadas. Mais investigações são necessárias para confirmar se os traquitos poderiam ou não ser as rochas evoluídas predominantes no oeste da Elevação do Rio Grande, em vez de rochas mais insaturadas como fonolitos.

A integração dos resultados de química mineral e geoquímica de rocha total obtidos para as rochas vulcânicas do oeste da ERG sugerem uma evolução magmática complexa em um sistema polibárico transcrustal com variações composticionais cíclicas devido a múltiplos estágios de recargas de magma e um forte controle por processos de fracionamento. Dentre os minerais estudados, o clinopiroxênio se destaca por sua variabilidade composicional e textural e é essencial para uma melhor compreensão das características do sistema magmático. Múltiplas evidências de desequilíbrio, especialmente no clinopiroxênio das rochas maficas, são indicativas de que a maioria dos núcleos primitivos de macrocristais reagiram com seus respectivos magmas hospedeiros que originaram as bordas mais evoluídas e cristais das matrizes. Enquanto alguns desses núcleos de clinopiroxênio poderiam ser antecristais, os núcleos mais primitivos encontrados no picro-basalto são

provavelmente xenocristais do manto que foram submetidos a metassomatismo críptico.

As assinaturas isotópicas de Pb, Sr e Nd das rochas estudadas são parecidas com as de amostras do tipo Gough, o que sugere que as fontes mantélicas do vulcanismo alcalino eocênico da ERG eram similares às de lavas do tipo Gough encontradas na Cadeia de Walvis e na Província Guyot, mesmo após um período considerável desde a separação entre os dois platôs. Quaisquer modelos utilizados para explicar as assinaturas EMI em rochas vulcânicas do Oceano Atlântico Sul precisam levar isso em consideração. Os dados de química mineral obtidos demonstram que características importantes sobre a petrogênese das rochas vulcânicas alcalinas do oeste da ERG são perdidas quando apenas a geoquímica de rocha total é considerada. Portanto, futuras análises isotópicas *in situ* de clinopiroxênio podem ser importantes para expandir o conhecimento sobre as fontes do vulcanismo alcalino da região, bem como um número maior de análises isotópicas de rocha-total.

Uma questão importante ainda não respondida sobre as rochas vulcânicas da Elevação do Rio Grande que também vale a pena ser investigada no futuro é qual o volume e duração do magmatismo alcalino em comparação com o magmatismo que formou o embasamento basáltico toleítico. Novas campanhas de amostragem poderiam também investigar se há rochas de afinidade alcalina na porção leste da ERG, uma vez que, até agora, apenas rochas de afinidade toleítica foram recuperadas por dragagens dos flancos do Lineamento Cruzeiro do Sul na região. Portanto, pesquisas futuras sobre a geologia da Elevação do Rio Grande certamente irão contribuir para o aumento do conhecimento científico acerca da combinação complexa de eventos magmáticos e tectônicos que resultou em sua topografia anômala no contexto da abertura do Oceano Atlântico Sul. Novos estudos poderiam também revelar se as assinaturas isotópicas das rochas da porção leste da ERG, que ainda são desconhecidas, são similares às das rochas vulcânicas da porção oeste ou não, com implicações importantes para modelos sobre a origem das assinaturas EMI em lavas do Atlântico Sul.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, A.T., 1968, Oxidation of the La Blanche Lake titaniferous magnetite deposit, Québec: Journal of Geology, v. 76 (4), p. 528-547.
- Andrade, S., Ulbrich, H.H.G.J., Gomes, C.B., Martins, L., 2014, Methodology for the determination of trace and minor elements in minerals and fused rock glasses with laser ablation associated with quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-Q-ICP-MS): American Journal of Analytical Chemistry, v. 5, p. 701–721.
- Amaral, G., Bushee, J., Cordani, U.G., Kawashita, K., Reynolds, J.H., 1967, Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 31(2), p. 117-142.
- Aoki, K., Kushiro, I., 1968, Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 18, p. 326-337, doi:10.1007/BF00399694.
- Ashley, A.W., Bizimis, M., Peslier, A.H., Jackson, M.G., Konter, J.G., 2020, Metasomatism and Hydration of the Oceanic Lithosphere: a Case Study of Peridotite Xenoliths from Samoa: Journal of Petrology v. 61(2), egaa028, p. 1-29, doi:10.1093/petrology/egaa028.
- Barker, P.F., 1983, Tectonic Evolution and Subsidence History of the Rio Grande Rise, in Barker, P.F., Carlson, R.L., Johnson, D.A., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 72: Texas, U.S. Government Printing Office, p. 953-976, doi:10.2973/dsdp.proc.72.151.1983.
- Barker P. F., Carlson R. L., Johnson D. A., Cepek P., Coulbourn W. T., Gamboa L. A., Hamilton N., Melo U., Pujol C., Shor A. N., Suzyumov A. E., Walton W. H. 1983. Site 516: Rio Grande Rise, in Barker, P.F., Carlson, R.L., Johnson, D.A., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 72: Texas, U.S. Government Printing Office, p. 155-338, doi:10.2973/dsdp.proc.72.105.1983
- Bryan W. B., Duncan R. A. 1983. Age and Provenance of Clastic Horizons from Hole 516F, in Barker, P.F., Carlson, R.L., Johnson, D.A., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 72: Texas, U.S. Government Printing Office, p. 475-477, doi:10.2973/dsdp.proc.72.118.1983.
- Cao, G., Xue, H., Tong, Y., 2022, Complex magmatic processes recorded by clinopyroxene phenocrysts in a magmatic plumbing system: A case study of mafic volcanic rocks from the Laiyang Basin, southeastern North China Craton: Lithos, v. 416-417, 106673, p. 1-13, doi:10.1016/j.lithos.2022.106673.
- Carmichael, I.S.E., 1967, The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 14 (1), p. 36-64, doi: 10.1007/BF00370985.
- Class, C., Lehnert, K., 2012, PetDB Expert MORB (Mid-Ocean Ridge Basalt) Compilation, Version 1.0. Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA), <https://doi.org/10.1594/IEDA/100060>. Accessed 15/09/2022.
- Class, C., le Roex, A., 2006, Continental material in the shallow oceanic mantle - How does it get there?: Geology, v. 34 (3), p. 129-132, doi:10.1130/G21943.1.

- Class, C., le Roex, A., 2011, South Atlantic DUPAL anomaly - Dynamic and compositional evidence against a recent shallow origin: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 305, p. 92-102, doi: 10.1016/j.epsl.2011.02.036.
- Colli, L., Fichtner, A., Bunge, H.-P., 2013, Full waveform tomography of the upper mantle in the South Atlantic region: evidence for pressure-driven westward flow in a shallow asthenosphere: *Tectonophysics*, v. 604, p. 26–40, doi: 10.1016/j.tecto.2013.06.015.
- Conrad, P.C., Bianco, T.A., Wessel, P., 2011, Patterns of intraplate volcanism controlled by asthenospheric shear: *Nature Geoscience*, v. 4, p. 317-321, doi:10.1038/ngeo1111.
- Constantino, R.R., Hackspacher, P.C., Souza, I.A., Costa, I.S.L., 2017, Basement structures over Rio Grande Rise from gravity inversion: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 75, p. 85-91, doi:10.1016/j.jsames.2017.02.005.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 2013. An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 3rd ed.: London, The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 498 p., doi:10.1180/DHZ.
- DePaolo, D. J., 1981, Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 53(2), p. 189-202.
- Deschamps, F., 2014, Mantle plume chemical diversity: *Nature Geoscience*, v. 7, p. 330-331, doi:10.1038/ngeo2117.
- Deschamps, F., Kaminski, E., Tackley, P.J., 2011, A deep mantle origin for the primitive signature of ocean island basalt: *Nature Geoscience*, v. 4, p. 879-882, doi:10.1038/ngeo1295.
- Dobosi, D., Fodor, R.V., 1992, Magma fractionation, replenishment, and mixing as inferred from green-core clinopyroxenes in Pliocene basanite, southern Slovakia: *Lithos*, v. 28, p. 133–150, doi:10.1016/0024-4937(92)90028-W.
- Ernesto, M., Marques, L.S., Piccirillo, E.M., Molina, E.C., Ussami, N., Comin-Chiaromonti, P., Bellieni, G, 2002, Paraná Magmatic Province - Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic considerations and alternative heat sources: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 118, p. 15–36, doi:10.1016/S0377-0273(02)00248-2.
- Fitton, J.G. (2007). The OIB Paradox, *in* Foulger, G.R., Jurdy, D. M., eds., Plates, Plumes and Planetary Processes. Geological Society of America Special Paper, 430, p. 387-412, doi:10.1130/2007.2430(20).
- Fodor, R.V., Husler, J.W., Kumar, N., 1977, Petrology of volcanic rocks from an aseismic rise: implications for the origin of the Rio Grande Rise, South Atlantic Ocean: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 35, p. 225-233, doi:10.1016/0012-821X(77)90125-X.
- Fodor, R.V., Thiede, J., 1977, Volcanic Breccia from DSDP site 357: implications for the composition and origin of the Rio Grande Rise, *in* Supko, P.R. et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 39: Washington, U.S. Government Printing Office, p. 537-543, doi: dsdp.proc.39.121.1977.
- Foulger, G.R., 2005, Mantle plumes: why the current skepticism?: *Chinese Science Bulletin*, v. 50(15), p. 1555-2005, doi:10.1360/982005-919.

- Galvão, I.L.G., de Castro, D.L., 2017, Contribution of global potential field data to the tectonic reconstruction of the Rio Grande Rise in the South Atlantic: Marine and Petroleum Geology, v. 86, p. 932-949, doi:10.1016/j.marpetgeo.2017.06.048.
- Gamboa, L.A.P., Rabinowitz, P.D., 1984, The Evolution of the Rio Grande Rise in the southwest Atlantic Ocean: Marine Geology, v. 58, p. 35-58, doi:10.1016/0025-3227(84)90115-4.
- GEBCO Compilation Group (2021). GEBCO 2021 Grid (doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f).
- Geraldes, M.C., Mohriak, W.U., Bonifácio, J.F., Cardoso, L.M.C., Moura, S.C., 2021, The role of the Rio Grande Rise on the continental Meso-Cenozoic alkaline magmatism in southwest Brazil, *In* Santos, A.C., Hackspacher, P.C. (eds.), Meso-Cenozoic Brazilian Offshore Magmatism, Academic Press, p. 257-292.
- Geraldes, M.C., Motoki, A., Costa, A., Mota, C.E., Mohriak, W.U. 2013. Geochronology (Ar/Ar and K-Ar) of the South Atlantic post-break-up magmatism, *In* Mohriak, W.U., Danforth, A., Post, P.J., Brown, D.E., Tari, G.C., Nemcok, M., Sinha, S.T. (eds), Conjugate Divergent Margins: Geological Society, London, Special Publications 369, p. 41-74, doi:10.1144/SP369.21.
- Gibb, F.G., 1973, The zoned clinopyroxenes of the Shiant Isles sill, Scotland: Journal of Petrology, v. 140, p. 203–230, doi:10.1093/petrology/14.2.203.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Day, J.A., Humphris, S.E., Dickin, A.P., 2005, Melt-generation processes associated with the Tristan mantle plume: Constraints on the origin of EM-1: Earth and Planetary Science Letters, v. 237, p. 744-767, doi:10.1016/j.epsl.2005.06.015.
- Goto, A., Yokoyama, K., 1988, Lherzolite inclusions in olivine nephelinite tuff from Salt Lake Crater, Hawaii: Lithos, v. 21(1), p. 67-80, doi:10.1016/0024-4937(88)90006-0
- Graça, M.C., Kusznir, N., Stanton, N.S.G., 2019, Crustal thickness mapping of the central South Atlantic and the geodynamic development of the Rio Grande Rise and Walvis Ridge: Marine and Petroleum Geology, v. 101, p. 230-242, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2018.12.011.
- Grazulis, S., Chateigner, D., Downs, R.T., Yokochi, A.T., Quiros, M., Lutterotti, L., Manakova, E., Butkus, J., Moeck, P., Le Bail, A., 2009, Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures: Journal of Applied Crystallography, v. 42, p. 726-729, doi: 10.1107/S0021889809016690.
- Hammer, J., Jacob, S., Welsch, B., Hellebrand, E., Sinton, J., 2016, Clinopyroxene in postshield Haleakala ankaramite 1. Efficacy of thermobarometry: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 171(7), doi:10.1007/s00410-015-1212-x.
- Hart, S.R., 1984, A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle: Nature, v. 309, p. 753-756, doi:10.1038/309753a0.
- Hart, S.R., Erlank, A.J. Kabte, E.J.D., 1974, Sea floor basalt alteration: some chemical and Sr isotopic effects. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 44, p. 219-230, doi:10.1007/BF00413167.
- Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., Taylor, P.N., Palacz, Z., 1986, Evidence from the Parana of south Brazil for a continental contribution to Dupal basalts: Nature, v. 322, p. 356-359, doi:10.1038/322356a0.

- Hoernle, K., Rohde, J., Hauff, F., Garbe-Schönberg, D., Homrighausen, S., Werner, R., Morgan, J.P., 2015, How and when plume zonation appeared during the 132 Myr evolution of the Tristan Hotspot: *Nature Communications*, v. 6, p. 7799, doi:10.1038/ncomms8799.
- Hofmann, A.W., 1997, Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism: *Nature*, v. 385, p. 219–229, doi:10.1038/385219a0.
- Hofmann, A. W. (2014) 3.3 - Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements: *In* Holland, H.D., Turekian, K.K., eds., *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*: Elsevier, p. 61-101, doi:10.1016/B978-0-08-095975-7.00203-5.
- Homrighausen, S., Hoernle, K., Geldmacher, J., Wartho, J. -A., Hauff, F., Portnyagin, M., Werner R., van den Bogaard, P., Garbe-Schönberg, D., 2018, Unexpected HIMU-type late-stage volcanism on the Walvis Ridge: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 492, p. 251-263, doi:10.1016/j.epsl.2018.03.049.
- Homrighausen, S. Hoernle, K., Hauff, F., Wartho, J. -A., van den Bogaard, P., Garbe-Schönberg, D., 2019, New age and geochemical data from the Walvis Ridge: The temporal and spatial diversity of South Atlantic intraplate volcanism and its possible origin: *Geochemica et Cosmochimica Acta*, v. 245, p. 16-34, doi: 10.1016/j.gca.2018.09.002.
- Hoyer, P.A., Haase, K.M., Regelous, M., O'Connor, J.M., Homrighausen, S., Geissler, W.H., Jokat, W., 2022a, Mantle plume and rift-related volcanism during the evolution of the Rio Grande Rise: *Nature Communications Earth & Environment*, v. 3(18), p. 1-10, doi:10.1038/s43247-022-00349-1.
- Hoyer, P.A., Haase, K.M., Regelous, M., O'Connor, J.M., Homrighausen, S., Geissler, W.H., Jokat, W. 2022b. Major and trace element analyses of volcanic rocks from the Rio Grande Rise and Jean Charcot Seamount Chain, South Atlantic., Version 1.0: Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA), doi:10.26022/IEDA/112205. Accessed on 04/03/2022.
- Humphreys, E.R., Niu, Y., 2009, On the composition of ocean island basalts (OIB): The effects of lithospheric thickness variation and mantle metasomatism: *Lithos*, v. 112, p. 118-136, doi:10.1016/j.lithos.2009.04.038.
- Ishikawa, A., Maruyama, S., Komiya, T., 2004, Layered Lithospheric Mantle Beneath the Ontong Java Plateau: Implications from Xenoliths in Alnöite, Malaita, Solomon Islands: *Journal of Petrology*, v. 45(10), p. 2011–2044, doi: 10.1093/petrology/egh046.
- Jerram, D. A., Martin, V., 2008, Understanding crystal populations and their significance through the magma plumbing system: *In* Annen, C., Zellmer, G.F., eds., *Dynamics of crustal magma transfer, storage and differentiation*: Geological Society, London, Special Publications 304, p. 133-148, doi:10.1144/SP304.7.
- Jovane, L., Hein, J.R., Yeo, I.A., Benites, M., Bergo, N.M., Corrêa, P.V.F., Couto, D.M., Guimarães, A.D., Howarth, S.A., Miguel, H.R., Mizell, K.L, Moura, D. S., Neto, F. L.V., Pompeu, M., Rodrigues, I.M.M., Santana, F.R., Serra, P.F., Pellizari, V.H., Signori, C.N., Silveira, I.C.A., Sumida, P.Y.G., Murton, B.J., Brandini, F.P. 2019. Multidisciplinary Scientific Cruise to the Rio Grande Rise: *Frontiers in Marine Science*, vol. 6, article 252, p. 1-7, doi: 10.3389/fmars.2019.00252.

- Johnston, A.D., Stout, J.H., 1984, A highly oxidized ferrian salite-, kennedyite-, forsterite-, and rhöenite-bearing alkali gabbro from Kauai, Hawaii and its mantle xenoliths: *American Mineralogist*, v. 69, p. 57-68.
- Koppers, A.A.P., Becker, T.W., Jackson, M.G., Konrad, K., Müller, R.D., Romanowicz B., Steinberger, B., Whittaker, J.M., 2021, Mantle plumes and their role in Earth Processes: *Nature Reviews Earth and Environment*, v. 2, p. 382-401, doi: 10.1038/s43017-021-00168-6.
- Lanari, P., Vho, A., Bovay, T., Airaghi, L., Centrella, S., 2019, Quantitative compositional mapping of mineral phases by electron probe micro-analyser: *Geological Society of London, Special Publications*, v. 478, p. 39-63.
- Lanari, P., Vidal, O., De Andrade, V., Dubacq, B., Lewin, E., Grosch, E., Schwartz, S. 2014, XMapTools: a MATLAB®-based program for electron microprobe X-ray image processing and geothermobarometry: *Computers and Geosciences*, v. 62, p. 227-240.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, 1986, A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram: *Journal of Petrology*, v. 27(3), p. 745–750, doi:10.1093/petrology/27.3.745.
- Lepage, L.D., 2003, ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite–magnetite geothermometry and geobarometry: *Computers & Geosciences*, v. 29(5), p. 673-678, doi:10.1016/S0098-3004(03)00042-6.
- Le Roex, A.P., Cliff, R.A., Adair, J.I., 1990. Tristan da Cunha, South Atlantic: geochemistry and petrogenesis of a basanite-phonolite lava series: *Journal of Petrology*, v. 31, p. 779-812, doi:10.1093/petrology/31.4.779.
- Li, M., McNamara, A.K., Garnero, J., 2014, Chemical complexity of hotspots caused by cycling oceanic crust through mantle reservoirs: *Nature Geoscience*, v. 7, p. 366-370, doi:doi.org/10.1038/ngeo2120.
- Lindsley, D.H., Spencer, K.J., 1982, Fe–Ti oxide geothermometry: Reducing analyses of coexisting Ti-magnetite (Mt) and ilmenite (Ilm): AGU 1982 Spring Meeting Eos Transactions, American Geophysical Union, v. 63(18), p. 471.
- Mallik, A., Dasgupta, R., 2012, Reaction between MORB-eclogite derived melts and fertile peridotite and generation of ocean island basalts: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 329-330, p. 97-108, doi:10.1016/j.epsl.2012.02.007.
- Mann, U., Marks, M., Markl, G., 2006, Influence of oxygen fugacity on mineral compositions in peralkaline melts: the Katzenbuckel volcano, Southwest Germany: *Lithos*, v. 91(1–4), p. 262–285, doi:10.1016/j.lithos.2005.09.004.
- Marques, L.S., Rocha-Júnior, E.R.V., Babinsky, M., Carvas, K.Z., Petronilho, L.A., De Min, A. 2016, Lead isotope constraints on the mantle sources involved in the genesis of Mesozoic high-Ti tholeiite dykes (Urubici type) from the São Francisco Craton (Southern Espinhaço, Brazil). *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, p. 105-122, doi:10.1590/2317-4889201620150010.
- Masotta, M., Mollo, S., Freda, C., Gaeta, M., Moore, G., 2013, Clinopyroxene-liquid thermometers and barometers specific to alkaline differentiated magmas: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 166, p. 1545–1561, doi: 10.1007/s00410-013-0927-9.

- Mather, B.R., Müller, R.D., Seton, M., Rutter, S., Nebel, O., Mortimer, N., 2020, Intraplate volcanism triggered by bursts in slab flux: *Science Advances*, v. 6(51), p. 1-8, doi:10.1126/sciadv.abd0953.
- Matzen, A.K., Wood, B.J., Baker, M.B., Stolper, E.M., 2017, The roles of pyroxenite and peridotite in the mantle sources of oceanic basalts: *Nature Geoscience*, v. 10, p. 530-535, doi:10.1038/ngeo2968.
- McDonough, W.F., Sun, S.-s., 1995, The composition of the Earth: *Chemical Geology*, v. 120, p. 223-253, doi:10.1016/0009-2541(94)00140-4.
- Mohriak, W.U., Nóbrega, M., Odegard, M.E., Gomes, B.S., Dickson, W.G., 2010, Geological and geophysical interpretation of the Rio Grande Rise, south-eastern Brazilian margin: extensional tectonics and rifting of continental and oceanic crusts: *Petroleum Geoscience*, v. 16, p. 231-245, doi:10.1144/1354-079309-910.
- Mollo, S., Blundy, J.D., Iezzi, G., Scarlato, P., Langone, A., 2013, The partitioning of trace elements between clinopyroxene and trachybasaltic melt during rapid cooling and crystal growth. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2013, 166, 1633–1654, doi: 10.1007/s00410-013-0946-6.
- Morgan, D.J., Blake S., Rogers, N.W., DeVivo, B., Rolandi, G., Macdonald, R., Hawkesworth, C.J., 2004, Time scales of crystal residence and magma chamber volume from modelling of diffusion profiles in phenocrysts: Vesuvius 1944: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 222, p. 933–946 (2004), doi:10.1016/j.epsl.2004.03.030.
- Mori, P.E., Reeves, S., Correia, C.T., Haukka, M., 1999, Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, São Paulo University: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 29(3), p. 441-446.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K., Gottardi, G., 1988, Nomenclature of pyroxenes: *American Mineralogist*, v. 73, p. 1123-1133, doi: 10.1007/BF01226262.
- Musset, A.E., Barker, P.F. 1983, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of basalts, Deep Sea Drilling Project site 51: in Barker, P.F., Carlson, R.L., Johnson, D.A., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 72: Texas, U.S. Government Printing Office, p. 467-470, doi:10.2973/dsdp.proc.72.116.1983.
- Navarro, M.S., Andrade, S., Ulbrich, H.H., Gomes, C.B., Girardi, A.V.V., 2008, The Direct Determination of Rare Earth Elements in Basaltic and Related Rocks using ICP-MS: Testing the efficiency of microwave oven sample decomposition procedures: *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 32(2), p. 167-180, doi: 10.1111/j.1751-908X.2008.00840.x.
- Neal, C.R., Nixon, P.H, 1985, Spinel-garnet relationships in mantle xenoliths from the Malaita Alnöites, Solomon Islands, South-Western Pacific: *Transactions of the geological society of South Africa*, v. 88, p. 347-354.
- Neave, D.A., Putirka, K.D., 2017, A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones: *American Mineralogist*, 2017, v. 102, p. 777–794, doi:10.2138/am-2017-5968.
- Neumann, E. R., 1991, Ultramafic and mafic xenoliths from Hierro, Canary Islands: evidence for melt infiltration in the upper mantle: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 106, p. 236–252, doi: 10.1007/BF00306436.

- Nimis, P., 1995, A clinopyroxene geobarometer for basaltic systems based on crystalstructure modelling: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 121, p. 115–125.
- Nimis, P, Taylor, W.R., 2000, Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 139(5), p. 541–554.
- Nimis, P, Ulmer, P., 1998, Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: an expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 133(1), p. 122–135.
- Niu, Y., 2018, Origin of the LLSVPs at the base of the mantle is a consequence of plate tectonics - A petrological and geochemical perspective: Geoscience Frontiers, v. 9(5), p. 1265-1278.
- Niu, Y., Wilson, M., Humphreys, E.R., O'Hara, M.J., 2011. The Origin of Intra-plate Ocean Island Basalts (OIB): the Lid Effect and its Geodynamic Implications: Journal of Petrology, v. 7(8), p. 1443-1468.
- Niu, Y., Wilson, M., Humphreys, E.R., O'Hara, M.J., 2012, A trace element perspective on the source of ocean island basalts (OIB) and fate of subducted ocean crust (SOC) and mantle lithosphere (SML): Episodes, v. 35, p. 310-327.
- NOAA National Geophysical Data Center. 2009:ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model. NOAA National Centers for Environmental Information. Accessed 22/03/2020.
- O'Connor J.M., Duncan R.A., 1990, Evolution of the Walvis Ridge-Rio Grande Rise Hot Spot System: Implications for African and South American Plate motions over plumes: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 95(B11), p. 17475-17502.
- O' Connor, J. M., Jokat, W., 2015, Tracking the Tristan-Gough mantle plume using discrete chains of intraplate volcanic centers buried in the Walvis Ridge: Geology, v. 43, p. 715-718.
- O'Connor, J. M., Jokat, W., le Roex, A. P., Class, C., Wijbrans, J. R., Keßling, S., Kuiper, K. F., Nebel, O., 2012, Hotspot trails in the South Atlantic controlled by plume and plate tectonic processes: Nature Geosciences, v. 5, p. 735-738.
- O' Connor, J. M., Jokat, W., Wijbrans, J., Colli, L., 2018, Hotspot tracks in the South Atlantic located above bands of fast flowing asthenosphere driven by waning pulsations from the African LLSVP: Gondwana Research, v. 53, p. 197-208.
- Pearce, J.A., 1996, A user's guide to basalt discrimination diagrams, *In* WYMAN, D.A. (ed.) Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration. Short Course Notes, 12. Geological Association of Canada, 79–113.
- Pearson, D.G. Canil, D., Shirey, S.B, 2014, 3.5 - Mantle Samples Included in Volcanic Rocks: Xenoliths and Diamonds: *In* Holland, H.D., Turekian, K.K., eds., Treatise on Geochemistry (Second Edition): Elsevier, p. 169-253, 10.1016/B978-0-08-095975-7.00216-3.
- Peate, D. W., Hawkesworth, C. J., Mantovani, M. S. M., Rogers, N. W., Turner, S. P. 1999, Petrogenesis and Stratigraphy of the High-Ti/Y Urubici Magma Type in the

- Paraná Flood Basalt Province and Implications for the Nature of ‘Dupal’-Type Mantle in the South Atlantic Region. *Journal of Petrology*, v. 40(3), p. 451-473.
- Perch-Nielsen, K., Supko, P. R., Boersma, A., Carlson, R. L., Dinkelman, M. G., Fodor, R. V., Kumar, N., McCoy, F., Thiede, J., Zimmerman, H. B. 1977. Site 357: Rio Grande Rise. *in* Supko, P.R. et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 39: Washington, U.S. Government Printing Office, p. 231-327, doi:10.2973/dsdp.proc.39.106.1977.
- Pilet, S., Baker, M.B., Stolper, E.M., 2008, Metassomatized Lithosphere and the Oirigin of Alkaline Lavas: *Science*, v. 320, p. 916-919.
- Praxedes, A.G.P., Castro, D.L., Torres, L.C., Gamboa, L.A.P., Hackspacher P.C., 2019, New insights of the tectonic and sedimentary evolution of the Rio Grande Rise, South Atlantic Ocean: *Marine and Petroleum Geology*, v. 110, p. 335-346.
- Putirka, K.D., 1999, Clinopyroxene + liquid equilibria to 100 kbar and 2450 K: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 135, p. 151–163.
- Putirka, K.D., 2008, Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 69, p. 61–120.
- Putirka, K.D., Johnson, M., Kinzler, R.J., Longhi, J., and Walker, D., 1996, Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0–30 kbar: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 123, p. 92–108.
- Putirka, K.D., Mikaelian, H., Ryerson, F., and Shaw, H.F., 2003, New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho: *American Mineralogist*, v. 88, p. 1542–1554.
- Rhodes, J.M., Dungan, M.A., Blanchard, D.P., Long, P.E., 1979, Magma mixing at mid-ocean ridges: Evidence from basalts drilled near 228 N on the Mid-Atlantic Ridge: *Tectonophysics*, v. 55, p. 35–61, doi: 10.1016/0040-1951(79)90334-2.
- Richardson, S.H., Erlank, A.J., Duncan, A. R., Reid D.L., 1982, Correlated Nd, Sr and Pb isotope variation in Walvis Ridge basalts and implications for the evolution of their mantle source: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 59, p. 327-342.
- Rocha-Júnior, E.R.V., Puchtel, I.S., Marques, L.S., Walker, R.J. Machado, F.B., Nardy, A.J.R., Babinski, M., Figueiredo, A.M.G, 2012, Re–Os isotope and highly siderophile element systematics of the Paraná continental flood basalts (Brazil): *Earth and Planetary Science Letters*, v. 337–338, p. 164-173, doi:10.1016/j.epsl.2012.04.050.
- Rohde, J. K., Bogaard, P. v. d., Hoernle, K., Hauff, F., Werner, R., 2013b, Evidence for an age progression along the Tristan-Gough volcanic track from new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages on phenocryst phases: *Tectonophysics*, v. 604, p. 60-71.
- Rohde, J., Hoernle, K., Hauff, F., Werner, R., O'Connor, J., Class, C., Garbe-Schönberg, D., Jokat, W., 2013a, 70 Ma chemical zonation of the Tristan-Gough hotspot track: *Geology*, v. 41, p. 335-338.
- Sager, W.W., Thoram, S., Engfer, D.W., Koppers, A.A.P., Class, C., 2021, Late Cretaceous ridge reorganization, microplate formation, and the evolution of the Rio Grande Rise – Walvis Ridge hot spot twins, South Atlantic Ocean: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 22, e2020GC009390.

- Salters, V.J.M., Sachi-Kocher, A., 2010, An ancient metasomatic source for the Walvis Ridge basalts: Chemical Geology, v. 273(3-4), p. 151-167, doi:10.1016/j.chemgeo.2010.02.010.
- Santos, R. V., Ganade, C.E., Lacasse, C.M., Costa, I.S.L., Pessanha, I., Frazão, E.P., Dantas, E.L., Cavalcante, J.A., 2019, Dating Gondwanan Continental crust at the Rio Grande Rise, South Atlantic: Terra Nova, v. 31, p. 424-429.
- Sato, K., Tassinari, C., Basei, M.A.S., Júnior, O.S., Onoe, A.T., Souza, M.D., 2014, Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP IIe/MC) of the Institute of Geosciences of the University of São Paulo, Brazil: analytical method and first results: Geologia USP Série científica, v. 14(3), p. 3-18.
- Sato, K., Tassinari, C.C.G., Kawashita, K., Petronilho, L., 1995, O método geocronológico Sm-Nd no IG/USP e suas aplicações: Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 67(3), p. 315-336.
- Schwindrofska, A., Hoernle, K., Hauff, F., Bogaard, P.v.d., Werner, R., Garbe-Schönberg, D., 2016, Origin of enriched components in the South Atlantic: Evidence from 40 Ma geochemical zonation of the Discovery Seamounts: Earth and Planetary Science Letters, v. 441, p. 167-177.
- Sen, G., 1988, Petrogenesis of spinel lherzolite and pyroxenite suite xenoliths from the Koolau shield, Oahu, Hawaii: Implications for petrology of the post-eruptive lithosphere beneath Oahu: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 100, p. 61–91, doi:10.1007/BF00399440.
- Sen, G., Yang, H-J. Ducea, M., 2003, Anomalous isotopes and trace element zoning in plagioclase peridotite xenoliths of Oahu (Hawaii): implications for the Hawaiian plume: Earth and Planetary Science Letters, v. 207 (1-4), p. 23-38, doi:10.1016/S0012-821X(02)01146-9.
- Smith, J.V., Brown, W.L., 1988, Feldspar Minerals vol. 1, Crystal Structure, Physical, Chemical and Microtextural Properties (Second Revised and Extended Edition): Berlin, Springer-Verlag., 828 p.
- Sobolev, A.V., Hofmann, A.W., Kuzmin, D.V., Yaxley G.M., Arndt, N.T., Chung, S.L., Danyushevsky, L.V., Elliot, T. Frey, F.A., Garcia, M.O., Gurenko, A.A., Kamenetsky, V. S., Kerr, A.C., Krivolutskaya, N.A., Matvienkov, V.V., Nikogosian, I.K., Rocholl, A., Sigurdsson, I.A., Sushchevskaya N.M., Teklay, M., 2007, The Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-Derived Melts: Science. v. 316, p. 412-417, doi:10.1126/science.113811.
- Stormer J.C., 1983, The effects of recalculation on estimates of temperature and oxygen fugacity from analyses of multicomponent iron-titanium oxides: American Mineralogist, v. 68(5-6), p. 586-594.
- Stracke, A., 2012, Earth's heterogeneous mantle: A product of convection-driven interaction between crust and mantle: Chemical Geology, v. 330–331, p. 274-299, doi:10.1016/j.chemgeo.2012.08.007.
- Streck, M.J., 2008, Mineral textures and zoning as evidence for open system processes: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 69, p. 595–622, doi:10.2138/rmg.2008.69.15.
- Sun, S.-s., and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics in ocean basalt: Implication for mantle composition and processes: In Saunders, A.D.,

- Norry, M.J., eds., Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, v. 42, p. 313-345.
- Todt, W. Cliff, R. A., Hanser, A., Hofmann, A. W., 1996, Evaluation of a 202Pb-205Pb Double Spike for High-Precision Lead Isotope Analysis, *In* Basu, A., Hart, S., eds., 1996, Earth Processes: Reading the Isotopic Code, The American Geophysical Union, v. 95, p. 429-437.
- Torquato, J. R., Kawashita, K., 1994, Geologia Nuclear V – O método Rb-Sr: Revista de Geologia, 46 p.
- Thompson G., Humphris S., Schilling, J. 1983. Petrology and geochemistry of basaltic rocks from Rio Grande Rise, South Atlantic: Deep Sea Drilling Project leg 72, hole 516F, *in* Barker, P.F., Carlson, R.L., Johnson, D.A., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 72: Texas, U.S. Government Printing Office, p. 457-466, doi:10.2973/dsdp.proc.72.115.1983.
- Thy, P., 1991, High and low pressure phase equilibria of a mildly alkalic lava from the 1965 Surtsey eruption: Experimental results: *Lithos*, v. 26, p. 223–243, doi:10.1016/0024-4937(91)90030-O.
- Ubide, T., Kamber, B.S., 2018, Volcanic crystals as time capsules of eruption history: *Nature Communications*, v. 9, 326 (2018), doi:10.1038/s41467-017-02274-w.
- Ubide T., Galé C., Arranz E., Lago M., Larrea P., 2014a. Clinopyroxene and amphibole crystal populations in a lamprophyre sill from the Catalonian Coastal Ranges (NE Spain): a record of magma history and a window to mineral-melt partitioning: *Lithos*, v. 184-187, p. 225-242, doi:10.1016/j.lithos.2013.10.029.
- Ubide, T., Galé, C., Larrea, P., Arranz, E., Lago, M., 2014b, Antecrysts and their effect on rock compositions: The Cretaceous lamprophyre suite in the Catalonian Coastal Ranges (NE Spain): *Lithos*, v. 206–207, p. 214–233, doi: 10.1016/j.lithos.2014.07.029.
- Ussami, N., Chaves, C.A.M., Marques, L.S., Ernesto, M., 2013, Origin of the Rio Grande Rise-Walvis Ridge reviewed integrating palaeogeographic reconstruction, isotope geochemistry and flexural modelling: *Geological Society London Special Publications*, v. 369, p.129-146.
- Van Orman, J.A., Grove, T.L., Shimizu, N., 2001, Rare earth element diffusion in diopside: influence of temperature, pressure, and ionic radius, and an elastic model for diffusion in silicates: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 141, p. 687–703, doi:10.1007/s004100100269.
- Verma, S. P., 1981, Seawater alteration effects on ^{87}Sr / ^{86}Sr , K, Rb, Cs, Ba and Sr in oceanic igneous rocks. *Chemical Geology*, v. 34, p. 81–89, doi:10.1016/0009-2541(81)90073-5.
- Verma, S. P., 1992, Seawater alteration effects on REE, K, Rb, Cs, Sr, U, Th, Pb and Sr–Nd–Pb isotope systematics of Mid-Ocean Ridge Basalt: *Geochemical Journal*, v. 26(3), p. 159-177, doi:10.2343/geochemj.26.159.
- Wasilewski, B., Doucet, L.S., Moine, B., Beunon, H., Delpech, G., Mattielli, N., Debaille, V., Delacour, A., Grégoire, M., Guillaume, D. Cottin, J-Y., 2017, Ultra-refractory mantle within oceanic plateau: Petrology of the spinel harzburgites from Lac Michèle, Kerguelen Archipelago: *Lithos*, v. 272–273, p. 336-349, doi:10.1016/j.lithos.2016.12.010.

- Wass, S.Y., 1979, Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks: *Lithos*, v. 12, p. 115–132.
- Weaver, B. L., Marsh, N. G., Tarney, J. 1983. Trace Element Geochemistry of Basaltic Rocks Recovered at Site 516, Rio Grande Rise, Deep Sea Drilling Project Leg 72, *in* Barker, P.F., Carlson, R.L., Johnson, D.A., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 72: Texas, U.S. Government Printing Office, p. 451-456, doi:10.2973/dsdp.proc.72.114.1983.
- White, W. M. (2015). Isotopes, DUPAL, LLSVPs and Anekantavada: Chemical Geology, v. 419, p. 10-28.
- Willbold, M., Stracke, A., 2006 Trace element composition of mantle end-members: implications for recycling of oceanic and upper and lower continental crust: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 7, Q04004, doi: 10.1029/2005GC001005.
- Willbold, M., Stracke, A., 2010, Formation of enriched mantle components by recycling of upper and lower continental crust: *Chemical Geology*, v. 276, pp. 188-197.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements: *Chemical Geology*, v. 20, p. 325-343.
- Wolff J. A. 2017. On the syenite-trachyte problem. *Geology*, 45(12): 1067-1070.
- Wulff-Pedersen, E., Neumann, ER., Jensen, B., 1996, The upper mantle under La Palma, Canary Islands: formation of Si-K-Na-rich melt and its importance as a metasomatic agent: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 125, p. 113–139, doi:10.1007/s004100050210.
- Wulff-Pedersen, E., Neumann, E. R., Vannucci, R., Bottazzi, P., Ottolini, L., 1999, Silicic melts produced by reaction between peridotite and infiltrating basaltic melts: ion probe data on glasses and minerals in veined xenoliths from La Palma, Canary Islands: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 137, p. 59–82, doi:10.1007/s004100050582.
- Zindler, A., Hart, S., 1986, Chemical Geodynamics: Annual Revisions in Earth Planetary Sciences, v. 14, p. 493-571.