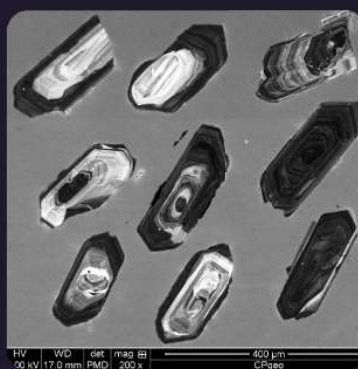


SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

# CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA

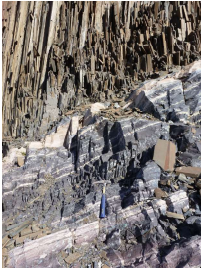
ANDRÉA RITTER JELINEK  
CARLOS AUGUSTO SOMMER



## IMAGENS DE CAPA E CONTRACAPA



Fotografia aérea do setor norte da Serra do Segredo, em Caçapava do Sul, RS, onde se destacam a Pedra do Segredo, em primeiro plano, e a Pedra da Abelha, logo à esquerda, geofomas esculpidas sobre conglomerados fluviais da Bacia do Camaquã. Ao fundo, alguns cerros formados por rochas metamórficas e o imponente alto de Caçapava, sobre granitoides diversos, rochas que registram diferentes momentos do Ciclo Brasileiro no sul do Brasil. A paisagem faz parte do Geoparque Caçapava Aspirante Unesco e é parcialmente inserida no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. Imagem obtida por Felipe Guadagnin. Legenda de André Weissheimer de Borba e Felipe Guadagnin.



Contato entre rochas sedimentares da Bacia do Paraná e soleira de diabásio do Grupo Serra Geral. Pedreira Carollo, região de Montenegro, RS. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.

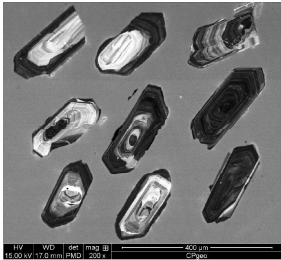


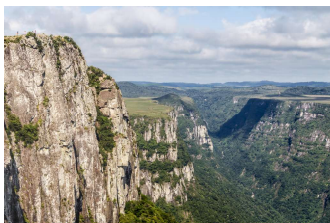
Imagem de catodoluminescência de cristais de zircão pertencentes ao Batólito de Florianópolis. Aumento de 200 vezes. Imagem e legenda de Andréa Ritter Jelinek.



Fotografia aérea oblíqua apresentando a morfologia da região correspondente ao extremo do Litoral Norte do RS, à direita observa-se a cidade de Torres/RS. Em primeiro plano observa-se a morfologia do campo de dunas localizado no Parque Estadual de Itapeva. Unidade essa localizada sobre o sistema Laguna-Barreira IV (holocênico). Logo após o baixio, na retaguarda do campo de dunas, ocorre a morfologia do sistema Laguna-Barreira III (pleistocênico). Ao fundo, com o relevo mais elevado, encontra-se a Formação Serra Geral pertencente à Bacia do Paraná. Imagem obtida por Eduardo H. R. Russo. Legenda de Eduardo Guimarães Barboza.



Minas do Camaquã, Mineração de cobre a céu aberto, Caçapava do Sul. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.



Derrames ácidos do Grupo Serra Geral, Bacia do Paraná, na região do Cânion Fortaleza, Parque Nacional da Serra Geral, Cambará do Sul, RS. Imagem licenciada de Depositphotos. Legenda de Carlos Augusto Sommer.



PUBLICAÇÃO ESPECIAL DO NÚCLEO RS/SC DA  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

**CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA  
DO RIO GRANDE DO SUL E  
DE SANTA CATARINA**

**Editores**

Andréa Ritter Jelinek  
Carlos Augusto Sommer



Porto Alegre, RS, 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial desta obra, sem autorização expressa dos autores ou da editora. A violação importará nas providências judiciais previstas no artigo 102, da Lei nº 9.610/1998, sem prejuízo da responsabilidade criminal. Os textos deste livro são de responsabilidade de seus autores.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

Edição: 1ª

Ano: 2021

**Editora Compasso Lugar Cultura**

Responsável André Suertegaray Rossato

Porto Alegre - RS - Brasil

Telefones (51) 984269928

compassolugarcultura@gmail.com

www.compassolugarcultura.com

Editores:

Andréa Ritter Jelinek

Carlos Augusto Sommer

Diagramador: Gabriel Zambom

Revisão de Texto: Gustavo Saldivar

**Conselho Editorial Compasso Lugar Cultura**

Álvaro Heidrich

Carlos Henrique Aigner

Cláudia Luíza Zeferino Pires

Dakir Larara Machado da Silva

Dilermando Cattaneo da Silveira

Dirce Maria Antunes Suertegaray

Helena Copetti Callai

Jaeme Luiz Callai

João Osvaldo Rodrigues Nunes

Laurindo Antonio Guasselli

Maíra Suertegaray Rossato

Nelson Rego

Roberto Verdum

Rosa Maria Vieira Medeiros

Sinthia Batista

**Realização**

**Sociedade Brasileira de Geologia**

**Diretoria Núcleo RS/SC:**

Diretora Presidente: Andréa Ritter Jelinek

Diretor Vice-Presidente: Carlos Augusto Sommer

Diretor Secretário: Lucas Debatin Vieira

Diretor Financeiro: Breno Leitão Weichel

Diretora de Programação Técnico-Científica: Rosemary Hoff

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

J47c

Jelinek, Andréa Ritter.

Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina /Andréa Ritter Jelinek e Carlos Augusto Sommer, organização – Sociedade Brasileira de Geologia - Porto Alegre : Compasso Lugar-Cultura, 2021.

504 p., il. col.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

<https://doi.org/10.29327/537860>

1. Geologia 2.Sociedade Brasileira de Geologia 3. Coletâneas de textos I. Jelinek, Andréa Ritter II. Sommer, Carlos Augusto III. Título

CDD 551

CDU 551.1/.4

Bibliotecária Responsável: Catarina Strapação Guedes Vianna CRB-10/2469

Índices para catálogo sistemático:

1. Geologia 551

# Evolução do Complexo Novo Hamburgo de injeção de areia e de silte

Léo Afraneo *Hartmann\**, Sandro Kucera *Duarte*

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

\* autor correspondente: [leo.hartmann@ufrgs.br](mailto:leo.hartmann@ufrgs.br)

## 1 INTRODUÇÃO

A liquefação e a fluidização de areia, com conseqüente injeção explosiva na camada-selo, podem levar ao extravasamento da mistura da lama siltico-arenosa (30% água, petróleo ou gás + 70% clastos) na superfície terrestre, em processo subaquoso ou subaéreo. A injeção é um processo universal, em bacias que contêm areia, e possui grande significado econômico. A liquefação é o processo em que a areia fica saturada em água, formando uma película de água, que envolve cada grão, eliminando, assim, o atrito. A fluidização ocorre, quando a mistura de 30 vol. % fluido (água, no caso estudado) + 70% areia é injetada nas fraturas da camada-selo, situada acima. A formação de corpos de arenito injetado pode constituir novos depósitos de petróleo ou pode causar fuga de petróleo de um reservatório. A injeção de areia nos basaltos e nos riodacitos do Grupo Serra Geral (GSG) foi uma etapa necessária (Hartmann *et al.*, 2012a; Rosenstengel & Hartmann, 2012; Hartmann, 2014), durante os processos hidrotermais, para formar o maior depósito mundial de geodos de ametista e de ágata, em Ametista do Sul (com produção atual de 600 t/mês) e em Los Catalanes (Uruguai).

Nós apresentamos a evolução paralela e simultânea do Complexo Novo Hamburgo (CNH) de injeção de areia e do Grupo Serra Geral (GSG), seu hospedeiro (Fig. 1a), durante o Cretáceo Inferior ( $134,5 \pm 2$  Ma; *e.g.* Hartmann *et al.*, 2019). Damos ênfase à distribuição nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, mas acrescentamos exemplos do Paraná, do Mato Grosso do Sul e do Uruguai (Hartmann & Baggio, 2014). A fisiografia do grupo vulcânico é diversificada (Figs. 1b, 1c, 1d, 1e, 1f e 1g), com escarpas acentuadas nas *cuestas* e com suaves planaltos, em extensas regiões interiores. A identificação dos processos que levaram à injeção de areia e de silte no GSG (Pinto *et al.*, 2011a, 2011b; Hartmann *et al.*, 2010) foi possível após os estudos realizados nas bacias petrolíferas *offshore* do Mar do Norte (*e.g.* Hurst *et al.*, 2011). No Brasil, o

entendimento dos processos de injeção e de efusão de sedimentos detríticos ainda exige avanços. A identificação de injetitos de areia e de silte pressupõe três características, por parte do observador: (1) percepção da existência de injetitos; (2) mente atilada; e (3) treinamento técnico. O estado da arte estabelece que, havendo acumulação de areia em uma sequência sedimentar, haverá injetitos. E essa relação geológica inclui o paleoerg Botucatu e a sequência de selos do Grupo Serra Geral.

Diques de areia em rochas encaixantes variadas, inclusive no GSG, são conhecidos de longa data. Foram, no entanto, considerados uma curiosidade geológica, devido à restrição do conhecimento ao estudo de diques de pequeno volume. Um avanço significativo no entendimento de injeção de areia em rochas argilosas ocorreu há 15 anos, através do aumento da resolução de perfis sísmicos no estudo de bacias *offshore* (por exemplo, Hurst *et al.*, 2011). Com isso, a interconexão das estruturas internas dos complexos de injetitos foi estabelecida. Alguns artigos foram publicados sobre o tema por Zvirtes *et al.* (2019, 2020). Esse conhecimento internacional foi aplicado ao GSG, através dos estudos do Grupo de Excelência em Minerais Estratégicos da UFRGS. A busca e a descoberta da origem dos geodos de ametista (Duarte *et al.*, 2009, 2011; Hartmann *et al.*, 2012a, 2012b, 2012c, 2013, 2015, 2019) na maior província produtora do mundo (Ametista do Sul) identificou sistematicamente corpos de arenito silicificado, como partes da sequência de eventos hidrotermais (Figs. 1h, 1i e 1j). As formas diversificadas e as relações de intrusão dos arenitos nos basaltos levaram à comparação com os processos descritos para injetitos no Mar do Norte e em outros lugares (Hartmann *et al.*, 2012a; Duarte & Hartmann, 2014). Dessa forma, o conhecimento de injetitos e de extruditos de areia foi aplicado ao GSG, com a

identificação das estruturas e dos processos (Arena *et al.*, 2014).

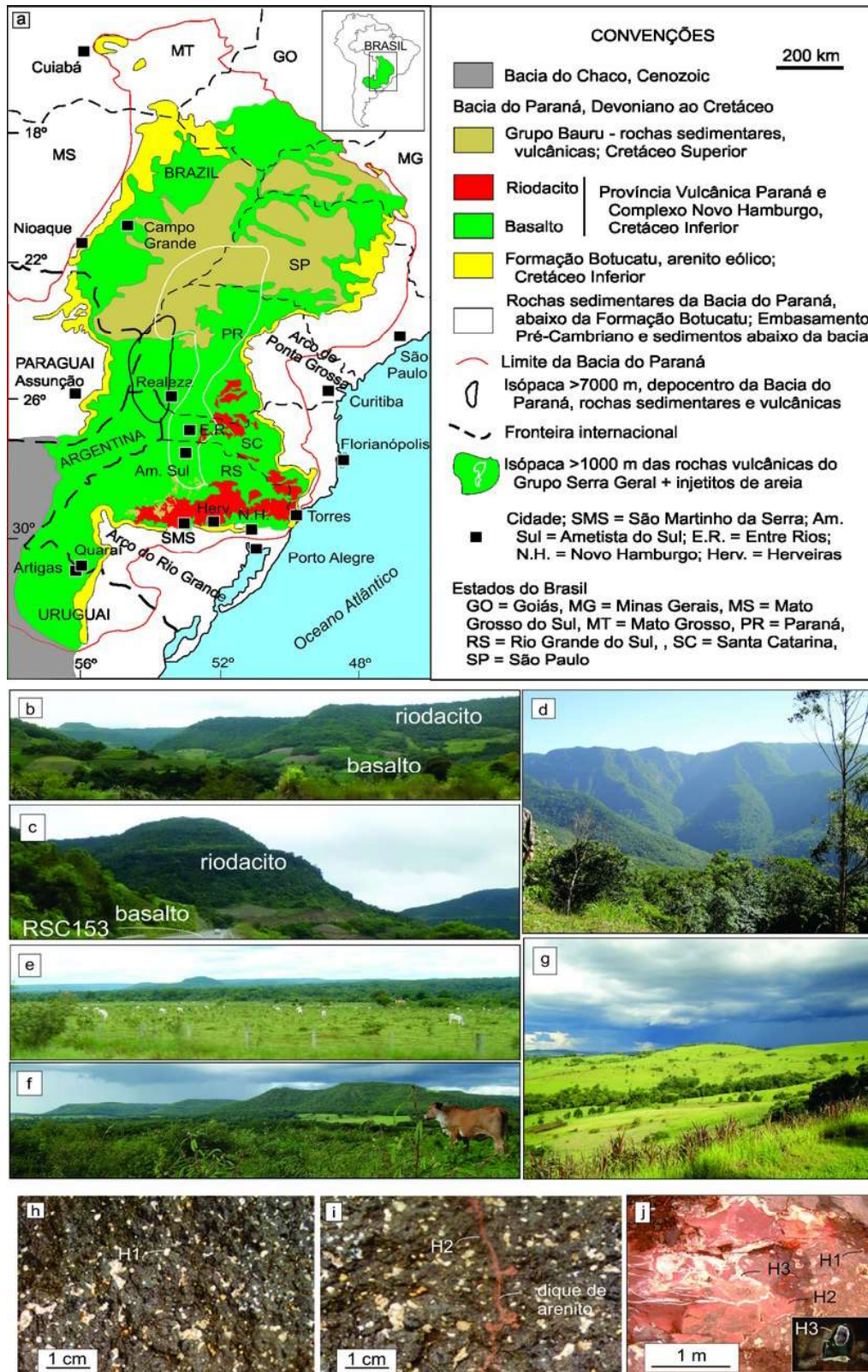
Nós apresentamos as estruturas de injeção e de efusão de lama síltico-arenosa do CNH e avaliamos os processos geológicos envolvidos (Figs. 2, 3, 4 e 5). Utilizamos a nomenclatura de Hurst *et al.* (2011), de Monnier *et al.* (2015) e de Chan *et al.* (2019), adaptada por Hartmann *et al.* (2014), que inclui dique, sill, lacólito, lopólito, asa, brecha, vulcão e extrudito, além de formas irregulares. A areia e o silte fluidizados têm comportamento mecânico semelhante ao da lava basáltica, e isso levou ao uso de nomenclatura análoga. Em contraste com complexos de injeção em bacias petrolíferas, o CNH foi formado em ambiente vulcânico intraplaca, tornando a relação dos arenitos com as rochas vulcânicas um caso único nos continentes. Os processos de formação de paralavas (Baggio *et al.*, 2016) a 1000-1800 °C não serão abordados.

## 2 PRINCIPAIS ESTRUTURAS E PROCESSOS

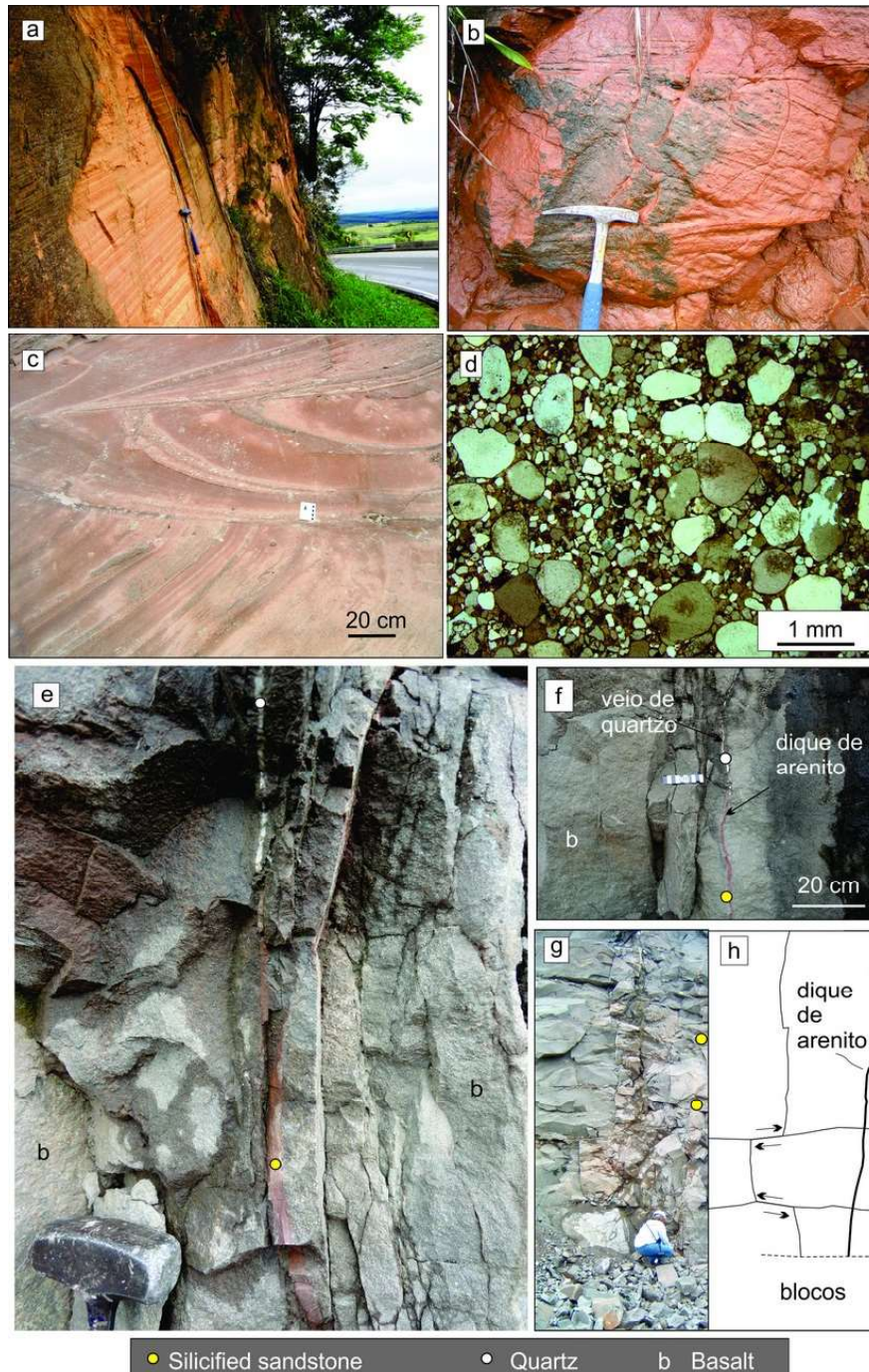
### 2.1 Arenito deposicional

A efusão das primeiras lavas do GSG recobriu as dunas ativas do paleoerg Botucatu. Um exemplo foi descrito por Hartmann *et al.* (2010) na região de Quaraí (RS), em que o primeiro derrame (colada Mata Olho, basalto) cobriu os vales interdunas. O segundo derrame (colada Catalán, andesito) cobriu esse derrame e tapou parte das dunas.

O arenito deposicional (camada-mãe) é a Formação Botucatu (Fig. 3), de idade cretácea e que ocorre interdigitado, na sua parte superior, com os primeiros derrames de lava (Scherer, 2000). As areias tiveram movimentação eólica no paleoerg, durante 16 Ma (Duarte *et al.*, 2020a, 2020b), para formar uma camada de arenito com es-



**Figura 1** - (a) Mapa geológico do Grupo Serra Geral, hospedeiro do Complexo Novo Hamburgo de injeção de areia e de silte (Hartmann *et al.*, 2020 e outras fontes); (b) (c) Aspectos fisiográficos do Grupo Serra Geral, incluindo o Complexo Novo Hamburgo, na *cuesta* de Herveiras (RS); (d) Defronte a Torres (RS); (e) Na Serra de Maracaju, em Nioaque (MS); (f) A norte de Campo Grande (MS); (g) Realeza (PR); (h) Primeiro evento hidrotermal de preenchimento de cavidades, por minerais de argila e por zeolitas (H1); (i) Segundo evento hidrotermal de injeção de areia (H2); (j) Terceiro evento hidrotermal de formação de *stockwork* de quartzo, após H1 e H2 (H3).



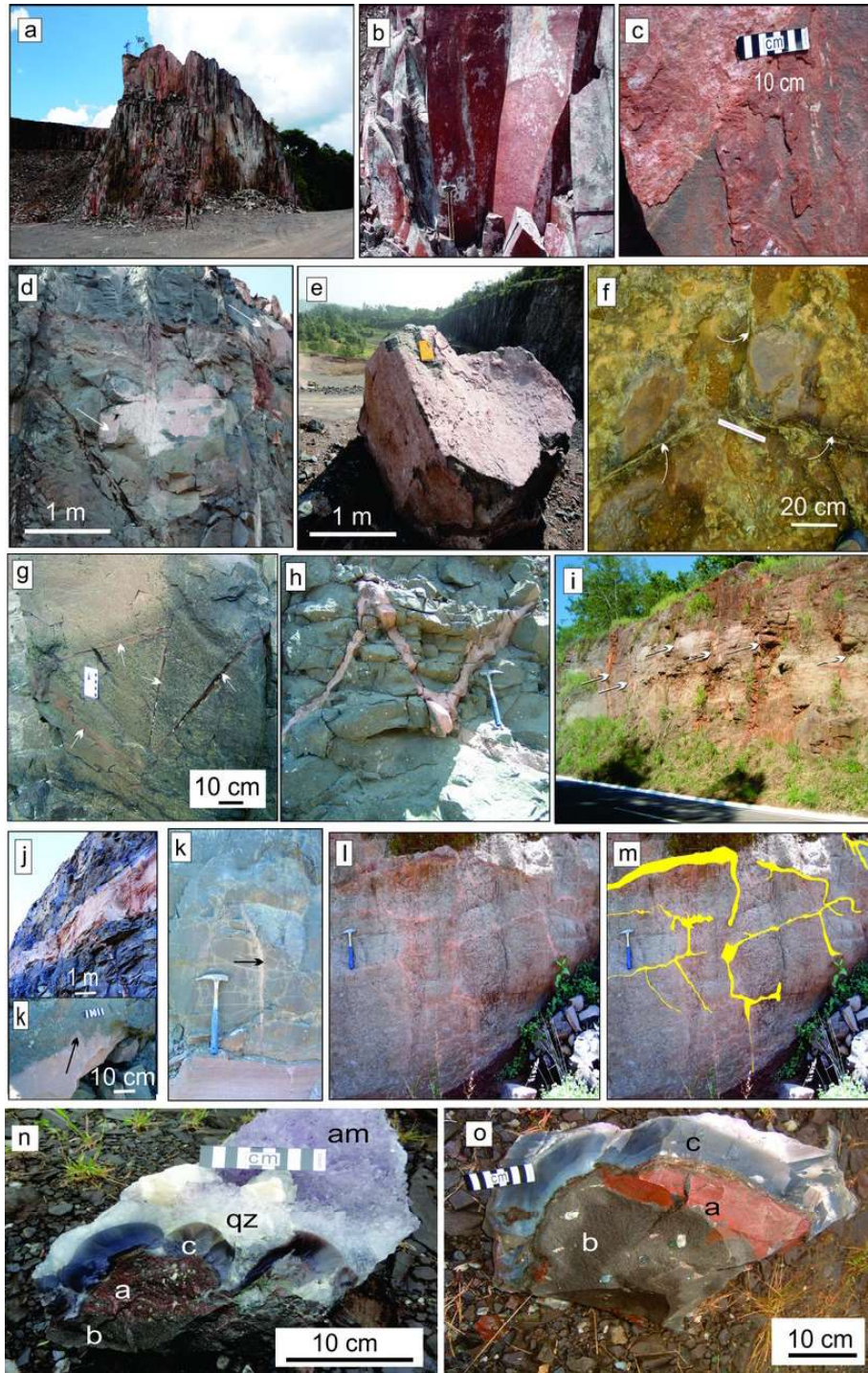
**Figura 2** - Formação Botucatu, com camadas-mãe eólicas: (a) Afloramento na seção-tipo da Formação Botucatu, em Serra de Botucatu, no estado de São Paulo (Rodovia Marechal Rondon, km 236); (b) Afloramento em Nioaque (MS), abaixo do primeiro derrame de basalto; (c) Afloramento em Torres (RS), abaixo do primeiro derrame de basalto; (d) Fotomicrografia ótica (com luz natural) de arenito eólico bimodal, em Nioaque (MS); (e) Diques de arenito em zonas de falhas rúpteis, na *cuesta* de Herveiras (RS); (f) (g) (h) Diques de arenito em zona de falha rúptil, na pedreira Sultepa, em Novo Hamburgo (RS).

grossura variável entre 10-200 m (em geral, 80 m). Os grãos de areia têm granulometria bimodal, com cimento pouco volumoso.

## 2. 2 Paleoquífero Guarani (Hn)

O fluido mobilizador da areia foi água, com componente significativo de gás





**Figura 3** - (a) (b) (c) Fotos de campo, com documentação do percurso de injeção da areia, na pedra da região de Realeza (PR); fina película de siltito (marrom avermelhado), de 1-3 mm, que recobre a disjunção colunar do basalto; (d) (e) Fina película de areia, de 1-5 mm, que recobre a disjunção colunar e as fraturas transversais à coluna da pedra Sultepa, em Novo Hamburgo (RS); (f) Vista em planta de finas películas de areia, de 1-5 mm, preenchendo a disjunção colunar de basalto, em Torres (RS); (g) Quatro fraturas preenchidas por arenito silicificado (indicadas por flechas), em Torres (RS); (h) Estrutura em asa de arenito silicificado, em dique alimentador (abaixo, o martelo), em Novo Hamburgo (RS); (i) Seis diques subverticais de arenito silicificado (indicados por flechas), em basalto, no Anel Viário Norte, em Campo Grande (MS); (j) (k) Sill de arenito silicificado, com dique alimentador, e dique de arenito injetado no basalto sobrejacente; (l) (m) Conjunto interligado de diques e de sills de arenito, contido em basalto, em Realeza (PR); (n) (o) Sequência de preenchimento de geodo, em Entre-Rios (SC) – base de basalto, seguida de arenito silicificado, de calcedônia, de quartzo e de ametista.

carbônico na região Novo Hamburgo-Torres (RS). A saturação da areia solta (não litificada) com água de chuva formou um dos maiores reservatórios de água doce dos continentes. O paleoaquífero Guarani foi instalado no Cretáceo Inferior, nas areias do paleoerg Botucatu (e nas areias da Formação Guará), e a movimentação eólica das areias estava ativa, durante a efusão dos primeiros derrames de lava do GSG (Scherer, 2000). O paleoerg contém zircão mais jovem, com 150 Ma (Duarte & Hartmann, 2020), delimitando a duração do erg em 150 Ma e a idade do vulcanismo em 135 Ma (Pinto *et al.*, 2011a; Hartmann *et al.*, 2019). Em algumas regiões (por exemplo, em Quaraí (RS)), o primeiro derrame (basalto) ocupou os vales interdunas, vindo o erg a ser parcialmente coberto pelo segundo derrame (andesito) (Hartmann *et al.*, 2010). O primeiro derrame (colada Mata Olho) permanece pouco caracterizado, mas o segundo (colada Catalán) é produtor, em escala mundial, dos maiores e dos mais valiosos geodos de ametista do grupo vulcânico. O terceiro derrame (colada Cordillera, basalto) também é grande produtor de geodos de ametista, tipo capelinha, que é semelhante ao de Ametista do Sul, tendo coberto o topo das dunas, em alguns locais.

A colada Catalán possui arenito silicificado injetado, enquanto a colada Cordillera possui sills de arenito silicificado, acima da camada mineralizada em geodos. Quanto tempo levou para encher o paleoerg de água de chuva, para os processos hidrotermais terem início? As medidas são geológicas e análogas às dos desertos atuais (por exemplo, Namíbia e Saara). Nos ergs atuais, a água do lençol freático aflora em grandes extensões nos oásis, em lagos e em banhados, com ocupação humana permanente. Em regiões mais distantes do oásis, pode-se encontrar água a pouca profundidade. Após tapar o erg com lava, as chuvas torrenciais, que ocorrem um

ou dois dias por ano no deserto, encheram as areias com água, dentro de poucos anos (exagerando, 1000 anos). A partir desse ponto – após o primeiro derrame, em alguns locais, e após o segundo derrame, em grandes extensões do erg –, o paleoaquífero estava saturado em água. Seguiu-se o aquecimento do aquífero a 150 °C e, sob a pressão das lavas, situadas acima, o aquífero foi liquefeito e fluidizado pela ação de terremotos, injetando, de forma explosiva, água quente e vapor + areia para dentro e para cima do derrame mais jovem.

### 2.3 Terremotos

Atividade sísmica é considerada usualmente como responsável pela agitação intensa da areia, causando liquefação, e pelo rompimento do selo, causando fluidização. Abalos sísmicos de grande intensidade (>6, na escala Richter) causaram agitação da areia saturada em água do paleoerg Botucatu (paleoaquífero Guarani) e sua liquefação. Essa perda de atrito entre os grãos da areia, devido ao envoltório de película de água em cada grão, conduziu à liquefação e à posterior fluidização, através da movimentação da água entre os grãos de areia. Em decorrência, a mistura água + areia ascendeu de maneira explosiva, injetando os derrames sobrepostos. O rompimento do selo basáltico foi causado por terremotos, pois, em algumas ocorrências, os diques de arenito estão associados a zonas de falha.

Terrenos vulcânicos ativos, mesmo em ambiente intraplaca, tem sismicidade intensa. Falhas são formadas por fraturamento e por deslocamentos de rochas, ligados a terremotos. As rochas vulcânicas do GSG apresentam falhas de grande porte e outras menores. Algumas falhas são restritas a segmentos inferiores da estratigrafia do grupo, não alcançando o topo. As zonas de falha são rúpteis e ‘secas’ – sem mineralização associada.

ada. A principal causa da sismicidade foi a abertura do Oceano Atlântico, com afinamento crustal e com rotação de blocos. O componente direcional das falhas não foi medido, mas o abatimento atinge 10-300 m, em Ametista do Sul (Rosenstengel & Hartmann, 2012).

O continuado aquecimento do paleoaquífero pelo elevado grau geotérmico, causado pela fusão parcial do manto, deixou a água sob pressão térmica e litostática das rochas sobrejacentes. A sísmica recorrente propiciou a repetição da injeção de areia, após cada evento de injeção de magma na crosta e de efusão na superfície. Um exemplo de associação de fraturamento de falhas com a injeção de diques de areia fica na *cuesta* de Herveiras (RS) (Hartmann & Duarte, 2020).

## 2. 4 Selamento do derrame (H1)

Derrames de basalto ou de riódacito são porosos (30 vol. % vesículas e microfaturas) após seu esfriamento, e necessitam ser selados, para que o processo de injeção explosiva de areia fluidizada ocorra. Os derrames do GSG mostram evidências de oclusão da porosidade, através da precipitação de minerais hidrotermais (H1) – zeolitas, minerais de argila e cobre nativo (Fig. 5) (Baggio *et al.*, 2018). Não há registro de vesículas remanescentes ('vazias') e as cavidades atuais são atribuídas à dissolução intempérica do conteúdo mineralógico das amígdalas.

As fraturas de esfriamento da lava (poligonais, em planta) apresentam deposição similar de minerais hidrotermais, mas sua abertura (1-10 mm) possibilitou o continuado fluxo de água e de vapor, ao longo de todos os processos geológicos subsequentes. Essa disjunção colunar se apresenta apenas em derrames espessos (>30 m), que são formados por esfriamento lento. A rocha é holocristalina, com granulação fina a média, e não apresenta alteração hidrotermal, uma

vez que o fluido escapou pelas fraturas verticais. Significativamente, rochas com essa estrutura permeável não contêm geodos de ametista.

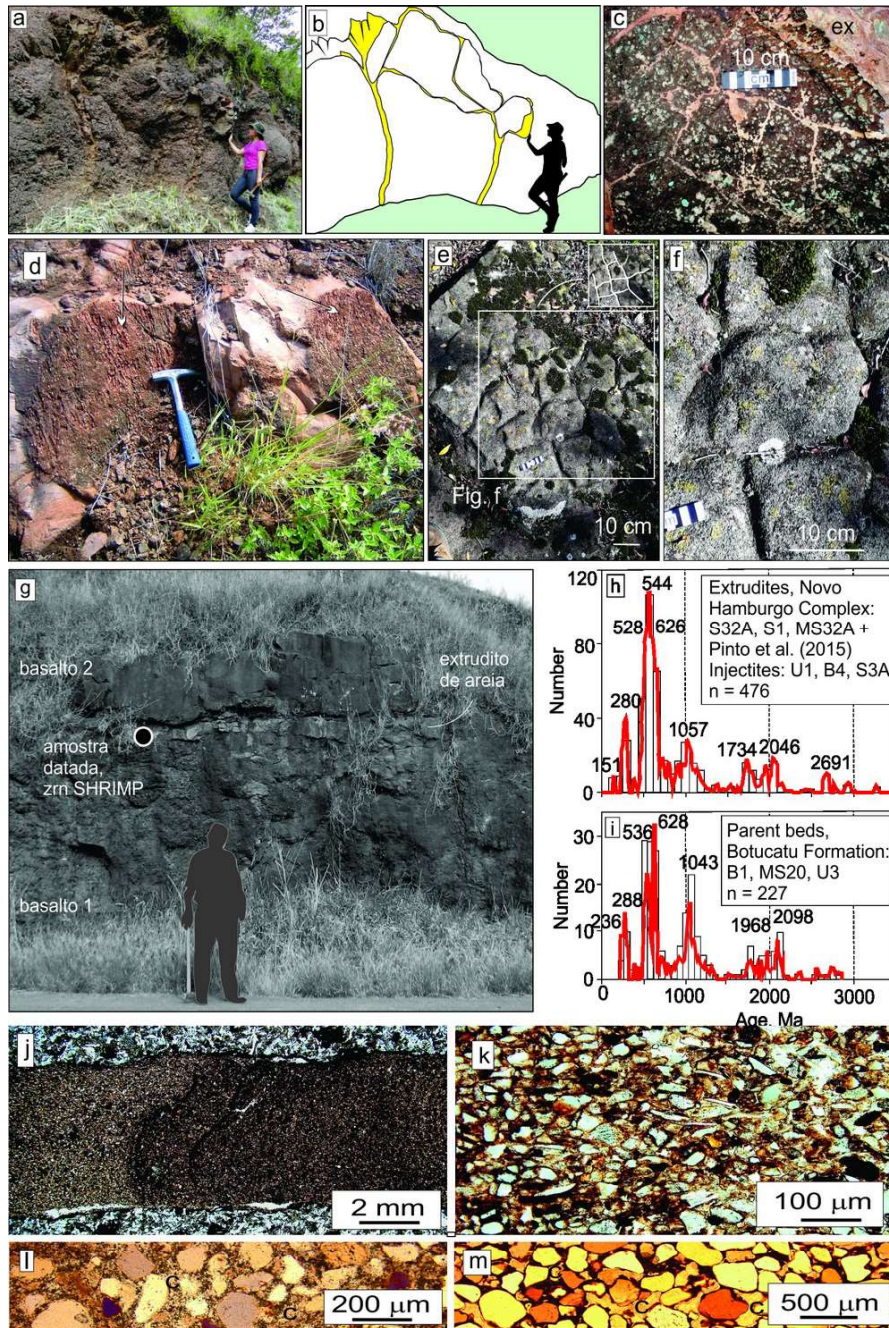
A pressão de água quente e de vapor aumentou nas rochas subjacentes, devido ao selamento do derrame com espessura <30 m. O aumento da pressão levou à injeção de areia, durante o rompimento do selo, devido a terremoto.

## 2. 5 Injeção, efusão e selamento da areia (H2)

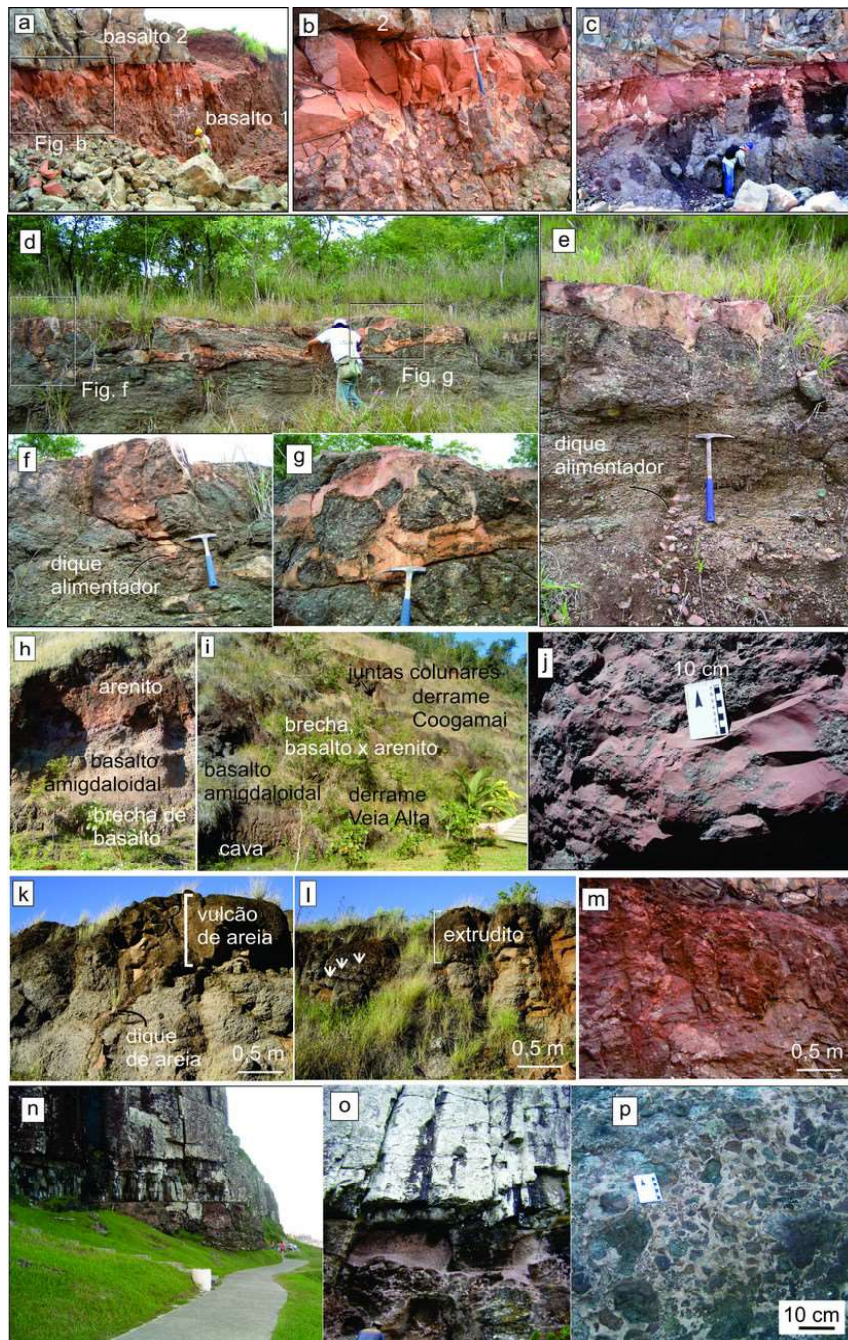
Cada evento de aquecimento do paleoaquífero gerou um evento hidrotermal (Hn), que ficou registrado nas rochas sobrejacentes. Houve, ao todo, três eventos hidrotermais para cada evento Hn. Após o evento de selamento do derrame mais recente (H1), ocorreu a injeção explosiva de água e de vapor (100 m/s). Tal evento (H2) ficou registrado em corpos intrusivos de areia com forma variada – dique, sill, lopólito, lacólito, asa e irregular. Ao atingir a superfície da crosta, em contato com a atmosfera (ou hidrosfera), a força da explosão hidrotermal formou corpos efusivos com geometria variada – brechas de basalto, em matriz de areia, camadas de areia, vulcões. A altura atingida pelos fragmentos de rocha e de areia foi dependente da força da explosão. A efusão da areia fluidizada na superfície formou lagos efêmeros no deserto. A possibilidade da presença de fósseis nos extruditos ainda deve ser testada.

A idade do zircão detrítico de extruditos de areia é semelhante à das camadas-mãe da Formação Botucatu. O estudo pioneiro de extrudito de areia em Iraí (RS) por Pinto *et al.* (2011a) foi expandido por Duarte *et al.* (2020b) para ampla área do complexo.

A desidratação dos injetitos ocorreu com diminuição de volume, gerando estruturas de dissecamento intraestratais. As fratu-



**Figura 4** - Estruturas de injeção de areia e de silte do Complexo Novo Hamburgo. (a) (b) Complexo conjunto de diques e de sills de areia, em amarelo (b), injetados na crosta amigdaloidal superior de basalto, em Realeza (PR); (c) Vista em planta dos canais alimentadores da injeção de areia, na superfície amigdaloidal do derrame de basalto, ligados ao extrudido de areia; (d) Ranhuras de arrasto no arenito silicificado (mostradas por flechas), formadas durante injeção de dique de areia, no contato com o basalto, em Serra de Maracaju (MS); (e) (f) fotos em planta de juntas de desidratação intraestratais de injetito de areia, originadas por perda de água da lama arenosa, após a injeção do sill de areia – inserção em (e) mostra fraturas de dissecação em ângulo reto, diferente dos contatos a 120° das fraturas de ressecamento de lama na superfície (*mudcrack*). Local do afloramento: rio Loch, no Distrito de Morro dos Bugres Baixo, em Santa Maria do Herval (RS); (g) Afloramento da amostra coletada para datação por U-Pb SHRIMP de zircão, por Pinto *et al.* (2011) (primeira datação de injetito de areia no Grupo Serra Geral) – ponto da coleta indicado. (h) (i) Histograma de frequência das idades datadas por U-Pb SHRIMP de zircão de várias amostras de extruditos e de camadas-mãe da Formação Botucatu do Complexo Novo Hamburgo (Duarte *et al.*, 2020b), mostrando idades de proveniência semelhantes; (j) Dique de siltito em basalto, em Realeza (PR); (k) Textura de siltito; (l) (m) Fotomicrografias de injetitos de areia, de granulação fina (unimodais) – cimento de calcedônia e de quartzo, indicados por 'c', em Serra de Maracaju (MS).



**Figura 5** - Fotos de campo de estruturas geradas na interface superior amigdaloidal do derrame de basalto com a atmosfera. (a) (b) Extrudido de areia (de 50 cm espessura) na parte superior de uma brecha, com blocos angulares amigdaloidais de basalto 1, em matriz de arenito – basalto 2 extravazou, posteriormente, sobre superfície do arenito, depositado em lâmina de água, na pedra Votorantim, em Campo Grande (MS); (c) Extrudido de areia (de 1-2 m de espessura), com diques alimentadores em forma de raiz de dente, derramado sobre basalto e, posteriormente, soterrado por novo derrame de basalto, na pedra Sultepa, em Novo Hamburgo (RS); (d) (e) (f) (g) Extrudido de areia, acima de brecha de blocos de basalto amigdaloidal, com matriz de arenito, com diques alimentadores – corte da rodovia BR-060, em Serra de Maracaju (MS); (h) (i) Estratigrafia de detalhe da parte superior do derrame Veia Alta, inclusive, do extrudido de areia, e das partes inferior e central do derrame Coogamai sobrejacente, mostrando uma cava (galeria) na Mina do Museu, em Ametista do Sul (RS); (j) Brecha hidrotermal, com blocos angulosos e amigdaloidais de basalto, imersos em matriz de siltito, em Realeza (PR); (k) (l) Vulcão de areia e de extrudido, com dique e com sills alimentadores, na rodovia Tenente Portela-Três Passos (RS); (m) Brecha com blocos de basalto amigdaloidal imersos em arenito – capa superior de extrudido foi depositada em depressão topográfica, à 500 m desse local, em Salto do Jacuí (RS); (n) (o) (p) Extrudido de areia (acima) e gradacional, com brecha hidrotermal de blocos de basalto amigdaloidais, imersos em arenito, em Torres (RS).

ras tendem a se cruzar em ângulo reto, diferente das fraturas de dissecação na superfície (*mudcracks*), que se cortam a 120° e que não foram observadas no Complexo Novo Hamburgo.

Em vários locais, são observadas fraturas losangulares (em três dimensões) preenchidas por areia. Essa evidência de soerguimento do derrame de lava em extensões de 1-40 km pode ter alcançado a pujança de uma explosão na atmosfera, devido à pressão do vapor. Em Quaraí (RS), tal ocorrência está acompanhada por dezenas (talvez, centenas) de estruturas circulares, com 1-100 m de diâmetro, contendo areia nas bordas. A pouca distância, está o Cerro do Jarau, uma estrutura circular de 10 km, que tem sido considerada registro do impacto de um meteoro. Há necessidade de reexame dessa estrutura, para testar a hipótese de se tratar de uma paleoduna composta.

Os injetitos e os extruditos perderam seu conteúdo de água e deixaram, como testemunho, as estruturas de areia. A percolação continuada de água quente levou à dissolução parcial dos grãos de areia e à reprecipitação de calcedônia e de quartzo como cimento. Na região de Novo Hamburgo, até Torres, o cimento é constituído parcialmente de calcita. O arenito silicificado é uma rocha competente, utilizada pelos povos nativos para a confecção de pontas de flechas e de lanças (Batalla *et al.*, 2020). Após essa extensa cimentação, o arenito perdeu a porosidade e passou a ser um selo impermeável. O continuado aumento da pressão de água quente e de vapor abaixo do selo efetivou o registro do processo hidrotermal H3 nas rochas.

## 2. 6 Formação de geodos de ametista (H3)

Do ponto de vista volumétrico, o

evento hidrotermal H3 foi o acontecimento preponderante para a alteração de basalto e para a geração de geodos de ametista de valor econômico. Em alguns geodos, estão preservadas as evidências de evolução no tempo, desde o basalto hospedeiro, recoberto em sequência hidrotermal por arenito silicificado, por calcedônia, por quartzo e por ametista.

## 2. 7 Geysers, fontes termais

Os processos hidrotermais, que ocorreram após a efusão de cada derrame de lava, levaram à formação de vulcões de areia ou de silte e aos extruditos associados. Esse ambiente é visualizado como favorável à existência de número elevado de *paleogeysers* e de fontes termais. Em outros locais (por exemplo, na Islândia e em Yellowstone, nos EUA), a ejeção de água formou depósitos de sínter (sílica) e de tufa (calcita ou aragonita), com 1-100 m de extensão e 1-5 m de espessura. Esses depósitos serão encontrados no GSG, a partir de busca sistemática, e serão de grande valor científico, para o entendimento dos processos geológicos do Cretáceo e da evolução da vida. A Fronteira Oeste do RS é um ambiente geológico propício. Um exemplo de tufa é o paleoerg jurássico de Nevada (EUA), com presença de conchas de moluscos.

## 2. 8 Elutriação da areia

A elutriação da areia fina e do silte do CNH, deixando areia grossa na camada-mãe, aconteceu durante a fluidização da areia do paleoerg, em que os fluxos de água quente e de vapor separaram as partículas finas das mais grossas. Elutriação é a separação de partículas pequenas (areia fina, argila) de partículas maiores (areia grossa), durante o fluxo ascendente de água quente e de vapor. A eficiência da separação das partí-

culas depende do tamanho, da forma e da densidade das partículas. A agitação da areia liquefeita desfez a estrutura das camadas eólicas de areia e a movimentação do fluido causou elutriação.

Evidências de elutriação são observadas na granulometria e na composição química dos injetitos (Fig. 6) (Duarte *et al.*, 2020a, 2020b). A areia do paleoerg tende a ser bimodal, ao passo que os grãos dos injetitos são unimodais; os grãos mais grossos ficaram retidos na camada-mãe. Nos injetitos, é comum a presença de níveis de lamito na areia fina. A elutriação causou um fracionamento químico dos arenitos e dos siltitos, conforme Duarte *et al.* (2020a, 2020b), principalmente nas *cuestas* de Maracaju (MS) e de Realeza (PR). A distância vertical percorrida pela lama injetada é um fator controlador da extensão de fracionamentos mineralógico e químico. Os injetitos de Maracaju percorreram colunas, com altura de 1-100 m, ao passo que a distância vertical percorrida em Realeza foi de 400-500 m. Em decorrência, os teores de SiO<sub>2</sub> e de outros elementos são mais altos nos injetitos de Realeza, em comparação com os de Maracaju.

O CNH expõe um modelo de elutriação em coluna vertical de 1700 m. O estudo dos processos de remobilização sedimentar irá trazer conhecimento geológico, baseado em situação ímpar.

## 2. 9 Erosão seletiva

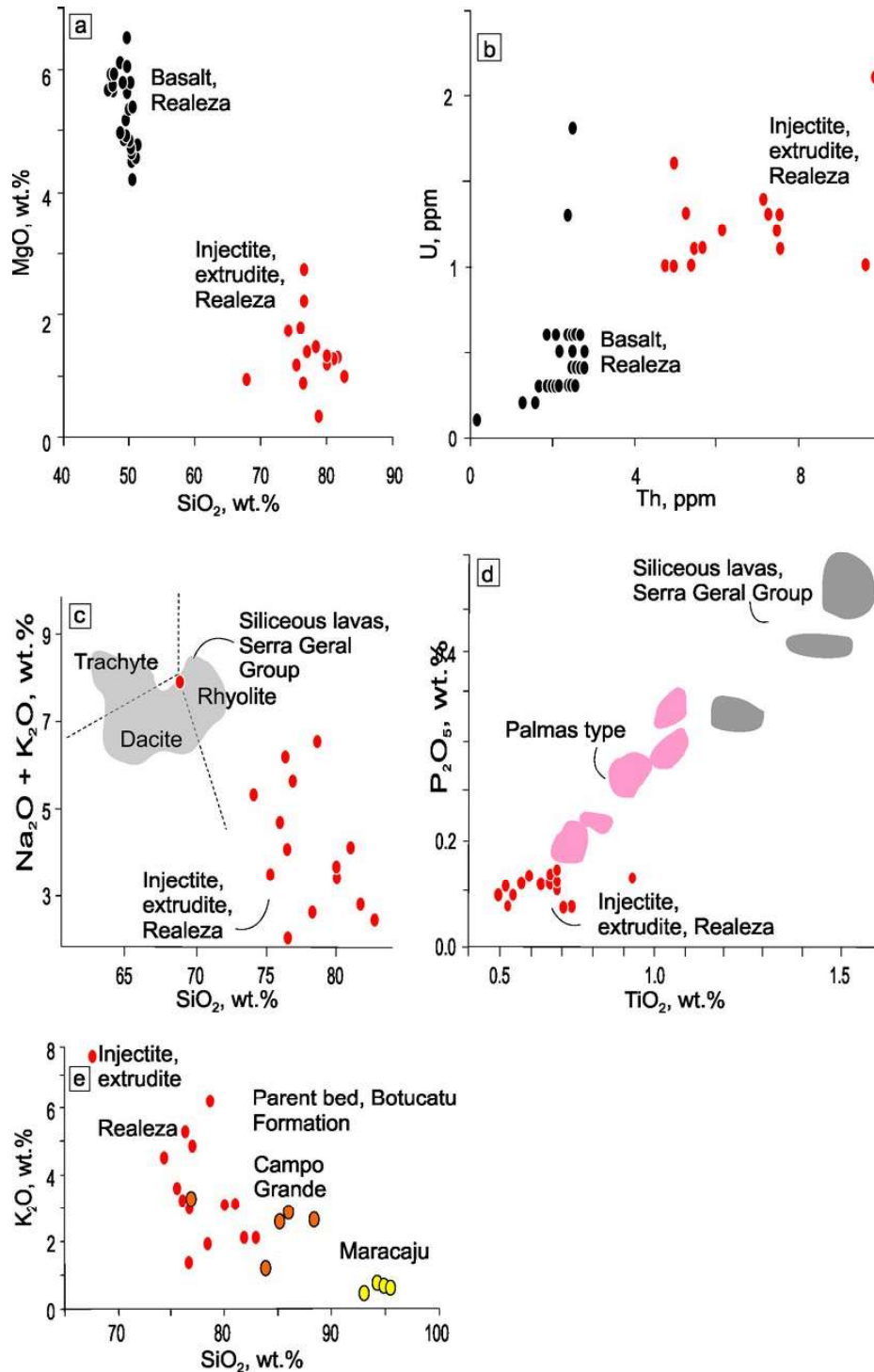
A erosão foi ativa e integrada no GSG e no CNH, desde o Cretáceo (134,5 Ma), até o Holoceno. A espessura do conjunto de rochas foi reduzida em 1500 m, a partir do original, que tinha em torno de 3000 m (Krob *et al.*, 2019). Os detritos resultantes foram carreados por rios, até a captação, em bacias intracontinentais e em bacias do Oceano Atlântico. Os processos erosivos das rochas estratificadas foram, principalmente, de dois tipos.

No primeiro tipo, o avanço da erosão sobre o escarpamento das *cuestas*, que cercam a província vulcânica, levou à redução da área total, e podem ser observados diques alimentadores injetados no embasamento Pré-Cambriano, no entorno da bacia, como testemunhos da extensão original.

O segundo tipo de erosão causou o rebaixamento da topografia, podendo ser organizado em dois aspectos, baseados na ausência ou na presença de silicificação das rochas vulcânicas. Os derrames de basalto e de riodacito são heterogêneos, ao longo de sua extensão no GSG, na dependência da história hidrotermal de cada derrame. O evento H1 causou a deposição de minerais hidrotermais nos poros das rochas, resultando em um maior volume, na crosta superior. Essa crosta resiste pouco à erosão e, em locais em que o derrame está exposto à superfície, a crosta foi erodida. Os eventos H2 – injeção de areia e de silte – e H3 – silicificação do derrame e formação de geodos de ametista – foram muito significativos, para estabelecer porções do derrame muito resistentes à erosão.

Em toda a extensão do GSG, os milhares de morros remanescentes da erosão mostram evidências de mineralização de sílica, inclusive, gossans (Pertille *et al.*, 2013; Gadens-Marcon *et al.*, 2014; Baggio *et al.*, 2015). As calhas dos rios circundantes não contêm fragmentos de geodos de ametista, significando que a porção erodida do derrame não estava silicificada e, assim, cedeu espaço ao rio e ao seu vale.

A erosão laminar horizontal foi a mais significativa na evolução do relevo vulcânico. As porções dos derrames, que não estavam silicificadas, foram erodidas com maior velocidade do que as porções silicificadas – mineralizadas a geodos de ametista. Com o tempo, mesmo o basalto ou o riodacito silicificado foi erodido, causando um rebaixamento geral da topografia da província



**Figura 6** - Diagramas geoquímicos, mostrando a composição dos injetitos de areia e de silte, em comparação com basalto e com arenitos da camada-mãe. As imagens (a) e (b) mostram a composição diferente dos injetitos, em comparação aos basaltos intercalados, em Realeza (PR), e as imagens (c) e (d) trazem a composição dos injetitos, em comparação aos riodacitos do Grupo Serra Geral; (e) fracionamento composicional dos injetitos, por elutriação de areia do paleoerg.

vulcânica. Mas os degraus das escadarias (*trap*, em holandês da província basáltica Ka-roo) permaneceram, durante toda a história

erosiva do GSG e do CNH. A observação do relevo remanescente atual da província vulcânica mostra que um morro permanece co-

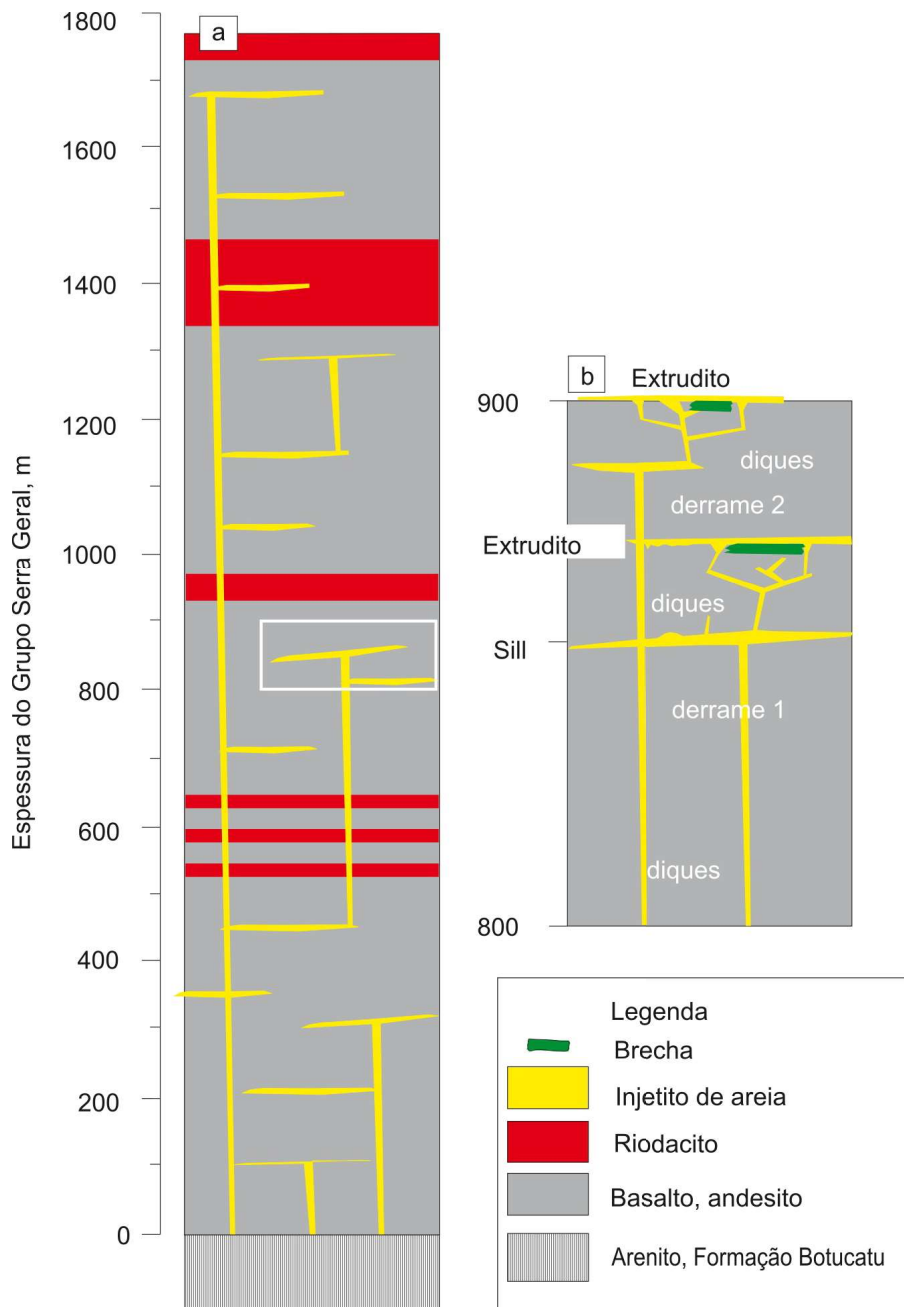


mo elevação porque está silicificado, potencialmente mineralizado a geodos de ametista.

### 3 MODELO EVOLUTIVO

O Complexo Novo Hamburgo de injeção de areia e de silte se originou por liquefação e por fluidização da areia

inconsolidada do paleoerg Botucatu. Esse processo ocorreu ao mesmo tempo em que o Grupo Serra Geral era formado, através da efusão de basalto e de riodacito. A injeção e a efusão de areia ocorreram, após cada derrame de lava, ao longo de toda a estratigrafia vulcânica (Fig. 7). As estruturas de injeção e de efusão de areia e de silte estão presentes em afloramento de rocha, ao longo de todo o



**Figura 7** - Modelo das estruturas de injetitos de areia e de silte do Complexo Novo Hamburgo, hospedadas nas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral.

Grupo Serra Geral, por exemplo, em Novo Hamburgo, em Herveiras, em Quaraí e em Torres (RS), em Campo Grande, em Nioaque e na *cuesta* de Maracaju (MS), em Botucatu (SP) e em Realeza (PR). Nos morros da praia de Torres, as estruturas estão expostas nos costões rochosos e constituem um bom exemplo, para a avaliação da hipótese de interação de lava líquida (1200 °C) com areia de erg (Petry *et al.*, 2007; Zeffass *et al.*, 2020). A recusa dessa hipótese e a demonstração dos processos de injeção de areia por Hartmann *et al.* (2012a) foi consolidada pelo principal grupo internacional de estudos de injetitos e de extruditos de areia (Zvirtes *et al.*, 2017).

A ascensão explosiva da mistura água (30 vol. %) + areia e silte (70 vol. %) causou elutriação do sedimento e, em partes elevadas da estratigrafia (Realeza (PR)), o sedimento depositado nas estruturas de subida foi silte. Intensa silicificação tornou o sedimento uma rocha resistente ao impacto. A presença do complexo possibilitou a formação dos geodos de ametista.

#### 4 CONCLUSÃO

O CNH de injeção de areia e de silte é o maior, em área, nos continentes, constituindo volume reduzido de corpos de arenito e de silte, mas está presente em todos os derrames de basalto e de riódacito estudados do GSG. Semelhante aos complexos de injetitos das bacias petrolíferas *offshore*, os corpos de arenito e de silte apresentam formas geométricas variadas – dique, sill, lopólito, lacólito, asa, cilindro, extrudito, vulcão e irregular. Diferente dos complexos em bacias *offshore*, os arenitos foram intensamente silicificados e possuem porosidade muito baixa. A elutriação da areia na mistura com água ascendente resultou na injeção de silte, em posições mais altas da estratigrafia.

#### AGRADECIMENTOS

O nosso aprendizado sobre os injetitos de areia ocorreu com a participação científica de Lauren da Cunha Duarte, Viter Magalhães Pinto, Juliana Pertille da Silva, Karine da Rosa Arena, Leonardo Manara Rosenstengel, Leonardo Cardoso Renner, Adélir José Strieder e Pedro Luiz Juchem. As figuras deste capítulo foram extraídas dos artigos publicados pelos autores e pelas pessoas mencionadas. Os estudos foram realizados com apoio financeiro sistemático do Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

#### REFERÊNCIAS

- Arena, K. R., Hartmann, L. A. & Baggio, S. B. 2014. Geological controls of copper, gold and silver in the Serra Geral Group, Realeza region, Paraná, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 63: 178-200.
- Batalla, N., Correa, L. C. & Araújo, A. G. M. 2020. Lithic landscapes and early inhabitants in southeastern Brazil: First perspectives from a case study in Dourado, São Paulo State. *PaleoAmerica*, 5(1): 44-61.
- Baggio, S. B., Hartmann, L. A., Andrade, R. H. P., Rizzotto, G. J., Duarte, S. K., Knijnik, D. B. & Simões-Neto, J. A. 2015. Basalt stratigraphy and silica gossans in Campo Grande and Serra de Maracaju, Mato Grosso do Sul, Paraná Volcanic Province. *Ore Geology Reviews*, 69: 73-87.
- Baggio, S. B., Hartmann, L. A. & Bello, R. M. S. 2016. Paralavas in the Cretaceous Paraná volcanic province, Brazil – a genetic interpretation of the volcanic rocks containing phenocrysts and glass. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88: 2167-2193.
- Baggio, S. B., Hartmann, L. A., Lazarov, M., Massonne, H. J., Opitz, J., Theye, T. & Viehhaus,

- T. 2018. Origin of native copper in the Paraná volcanic province, Brazil, integrating Cu stable isotopes in a multi-analytical approach. *Mineralium Deposita*, 53: 417-434.
- Chan, M. A., Hasiotis, S. T. & Parrish, J. T. 2019. Enigmatic clastic pipe swarms and implications for fluidization dynamics in aeolian deposits. *Sedimentology*, 66: 513-535.
- Duarte, L. C., Hartmann, L. A., Ronchi, L. H., Berner, Z., Theye, T. & Massonne, H. J. 2011. Stable isotope and mineralogical investigation of the genesis of amethyst geodes in the Los Catalanes gemological district, Uruguay, southernmost Paraná volcanic province. *Mineralium Deposita*, 46: 239-255.
- Duarte, L. C., Hartmann, L. A., Vasconcellos, M. A. Z., Medeiros, J. T. N. & Theye, T. 2009. Epigenetic formation of amethyst-bearing geodes from Los Catalanes gemological district, Artigas, Uruguay, southern Paraná Magmatic Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184: 427-436.
- Duarte, S. K. & Hartmann, L. A. 2014. Evolution of sand injectites from the Novo Hamburgo Complex, Paraná volcanic province. In: Hartmann, L. A. & Baggio, S. B. (eds.) *Metallogeny and mineral exploration in the Serra Geral Group*. Porto Alegre, IGeo/UFRGS, 560p.
- Duarte, S. K., Hartmann, L. A. & Baggio, S. B. 2020a. Fluidized sand effusion over successive basalt flows of the northwestern Paraná volcanic province. *Journal of South American Earth Sciences*, 99: 102505.
- Duarte, S. K., Hartmann, L. A., Santos, J. O. S. & McNaughton, N. J. 2020b. Evolution of sand and silt injection and effusion around the rim and depocenter of Paraná volcanic province. *Journal of South American Earth Sciences*, 102: 102651.
- Gadens-Marcon, G., Mendonça-Filho, J. G., Guerra-Sommer, M., Carvalho, M. A., Pires, E. F. & Hartmann, L. A. 2014. Relation between the sedimentary organic record and climatic oscillations in the Holocene attested by paly-nofacies and organic geochemical analyses from a pond of altitude in southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86: 1077-1089.
- Hartmann, L. A. 2014. A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente. *Ciência e Natura (UFSM)*, 36: 173-182.
- Hartmann, L. A., Antunes, L. M. & Rosenstengel, L. M. 2014. Stratigraphy of amethyst geode-bearing lavas and fault-block structures of the Entre Rios mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86: 187-198.
- Hartmann, L. A., Arena, K. R. & Duarte, S. K. 2012a. Geological relationships of basalts, andesites and sand injectites at the base of the Paraná volcanic province, Torres, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237-238: 97-111.
- Hartmann, L. A. & Baggio, S. B. (eds.) 2014. *Metallogeny and mineral exploration in the Serra Geral Group*. Porto Alegre, IGeo/UFRGS, 560p.
- Hartmann, L. A., Baggio, S. B., Brückmann, M. P., Knijnik, D. B., Lana, C., Massonne, H. J., Opitz, J., Pinto, V. M., Sato, K., Tassinari, C. C. G. & Arena, K. R. 2019. U-Pb geochronology of Paraná volcanics combined with trace element geochemistry of the zircon crystals and zircon Hf isotope data. *Journal of South American Earth Sciences*, 89: 219-226.
- Hartmann, L. A., Baggio, S. B. & Duarte, S. K. 2013. Decoding geochemical and gamma-spectrometric signatures from lavas and sand injectites at the base of the Paraná volcanic province, Novo Hamburgo, Brazil. *International Geology Review*, 55: 510-524.
- Hartmann, L. A. & Duarte, S. K. 2020. Novo Hamburgo Complex formed by hydrothermal, explosive injection of Botucatu erg sand into extensive tracts of Paraná Volcanic Province (S Brazil). *Journal of Sedimentary Environments*, 5(2).
- Hartmann, L. A., Duarte, L. C., Massonne, H. J.,

- Michelin, C., Rosenstengel, L. M., Bergmann, M., Theye, T., Pertille, J., Arena, K. R., Duarte, S. K., Pinto, V. M., Barboza, E. G., Rosa, M. L. C. C. & Wildner, W. 2012b. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdaloids and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay. *International Geology Review*, 54: 1-14.
- Hartmann, L. A., Medeiros, J. T. N., Baggio, S. B. & Antunes, L. M. 2015. Controls on prolate and oblate geode geometries in the Veia Alta basalt flow, largest world producer of amethyst, Paraná volcanic province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 66: 243-251.
- Hartmann, L. A., Medeiros, J. T. N. & Petruzellis, L. T. 2012c. Numerical simulations of amethyst geode cavity formation by ballooning of altered Paraná volcanic rocks, South America. *Geofluids*, 12: 133-141.
- Hartmann, L. A., Wildner, W., Duarte, L. C., Duarte, S. K., Pertille, J., Arena, K. R., Martins, L. C. & Dias, N. L. 2010. Geochemical and scintillometric characterization and correlation of amethyst geode bearing Paraná lavas from the Quaraí and Los Catalanes districts, Brazil and Uruguay. *Geological Magazine*, 147: 954-970.
- Hurst, A., Scott, A. & Vigorito, M. 2011. Physical characteristics of sand injectites. *Earth-Science Reviews*, 106: 215-246.
- Krob, F. C., Glasmacher, U. A., Karla, M., Perner, M., Hackspacher, P. C. & Stockli, D. F. 2019. Multi-chronometer thermochronological modelling of the Late Neoproterozoic to recent t-T-evolution of the SE coastal region of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 92: 77-94.
- Monnier, D., Gay, A., Imbert, P., Cavailles, T., Soliva, R. & Lopez, M. 2015. Sand injectites network as a marker of the palaeostress field, the structural framework and the distance to the sand source: example in the Vercorian Basin, SE France. *Journal of Structural Geology*, 79: 1-18.
- Pertille, J., Hartmann, L. A., Duarte, S. K., Arena, K. R., Rosa, M. L. C. C. & Barboza, E. G. 2013. Gossan characterization in the Quaraí and Los Catalanes amethyst geode districts (Brazil and Uruguay), Paraná volcanic province, using rock geochemistry and gamma-spectrometry. *Journal of Geochemical Exploration*, 124: 127-139.
- Petry, K., Jerram, D. A., Almeida, D. P. M. & Zerfass, H. 2007. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159: 313-325.
- Pinto, V. M., Hartmann, L. A., Santos, J. O. S., McNaughton, N. J. & Wildner, W. 2011a. Zircon U-Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~135 Ma. *Chemical Geology*, 281: 93-102.
- Pinto, V. M., Hartmann, L. A. & Wildner, W. 2011b. Epigenetic hydrothermal origin of native copper and supergene enrichment in the Vista Alegre district, Paraná basaltic province, southernmost Brazil. *International Geology Review*, 53: 1163-1179.
- Rosenstengel, L. M. & Hartmann, L. A. 2012. Geochemical stratigraphy of lavas and fault-block structures in the Ametista do Sul geode mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, 48: 332-348.
- Zerfass, H., Anjos-Zerfass, G. S., Ruban, D. A. and Yashalova, N. N. 2020. Basalt hills of Torres, southern Brazil: World-class geology, its heritage value, and tourism perspectives. *Journal of South American Earth Sciences*, 97: 102424.
- Zvirtes, G., Hurst, A., Philipp, R. P., Palladino, G. & Grippa, A. 2019. The Tumey Giant Injection Complex, Tumey Hill, California (USA). *Journal of the Geological Society*, Londres. DOI: doi.org/10.1144/SP493-2019-3.
- Zvirtes, G., Philipp, R. P., Hartmann, L. A.,

Hurst, A., Palladino, G. & Alessandretti, L. 2017. Spatial and genetic relationships between the fluidization and injection of eolian sand and volcanic processes, Paraná volcanic province, Brazil. *In*: Hurst, A., Silcock, S., Dennis, H., Huuse, M., Lovelock, C., Wild, J. (Eds.) *Subsurface sand remobilization and injection: implications for oil and gas exploration and development*. Geological Society of London, p. 89. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/315693264\\_Spatial\\_and\\_Genetic\\_Relationships\\_between\\_the\\_Fluidization\\_and\\_Injection\\_of\\_Eolian\\_Sand\\_and\\_Volcanic\\_Processes\\_Torres\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/315693264_Spatial_and_Genetic_Relationships_between_the_Fluidization_and_Injection_of_Eolian_Sand_and_Volcanic_Processes_Torres_Brazil). Acesso em: 21 mar. 2020.

Zvirtes, G., Philipp, R. P., Hurst, A., Palladino, G., De Ros, L. F. & Grippa, A. 2020. Petrofacies of Eocene sand injectites of the Tumey Giant Injection complex, California (USA). *Sedimentary Geology*, 400. DOI: [doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105617](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105617).