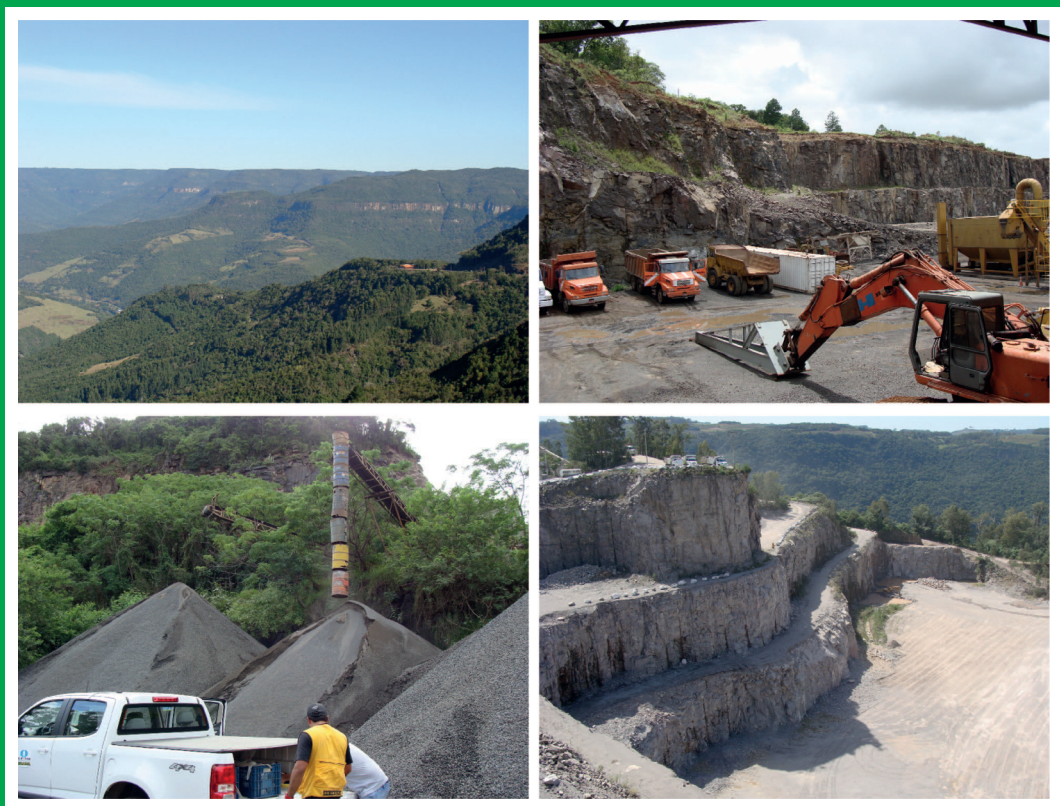


# PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

## AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL: GRUPO SERRA GERAL DA BACIA DO PARANÁ NO RIO GRANDE DO SUL



### INFORME DE RECURSOS MINERAIS

Série Insumos Minerais para Agricultura, nº 26

## **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

### **Ministro de Estado**

Bento Albuquerque

### **Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**

Pedro Paulo Dias Mesquita

## **SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**

### **DIRETORIA EXECUTIVA**

#### **Diretor Presidente**

Esteves Pedro Colnago

#### **Diretor de Geologia e Recursos Minerais**

Marcio José Remédio

#### **Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial**

Alice Silva de Castilho

#### **Diretor de Infraestrutura Geocientífica**

Paulo Afonso Romano

#### **Diretor de Administração e Finanças**

Cassiano de Souza Alves

### **COORDENAÇÃO TÉCNICA**

#### **Chefe do Departamento de Recursos Minerais**

Marcelo Esteves Almeida

#### **Chefe da Divisão de Projetos Especiais e Minerais Estratégicos**

Ioná de Abreu Cunha

#### **Chefe da Divisão de Geoquímica**

Silvana de Carvalho Melo

#### **Chefe do Departamento de Geologia**

Lúcia Travassos da Rosa Costa

#### **Chefe da Divisão de Geologia Básica**

Vladimir Cruz de Medeiros

#### **Chefe da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica**

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

#### **Chefe da Divisão de Editoração Geral**

Valter Alvarenga Barradas

### **SUPERINTENDÊNCIA DE PORTO ALEGRE**

#### **Superintendente**

Alexandre Trevisan Chagas (Interino)

#### **Gerência de Geologia e Recursos Minerais**

Carla Klein

#### **Supervisores da Gerência de Geologia e Recursos Minerais**

Bruno Ludovico Dihl Horn

Jorge Henrique Laux

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**  
**SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL**  
**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**  
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS  
I PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL I

## **AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL**

---

# **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL AGROMINERAL DO BRASIL GRUPO SERRA GERAL DA BACIA DO PARANÁ NO RIO GRANDE DO SUL**

Estado do Rio Grande do Sul

**ORGANIZADORA**

Magda Bergmann

**INFORME DE RECURSOS MINERAIS**  
Série Insumos Minerais para Agricultura nº26



---

Porto Alegre  
2021

## REALIZAÇÃO

Superintendência de Porto Alegre

## ORGANIZAÇÃO

Magda Bergmann

## TEXTO EXPLICATIVO

### 1. Introdução

Magda Bergmann

### 2. Metodologia

Magda Bergmann  
Monica Mazzini Perrotta

### 3. Conceituação de agrominerais e rota tecnológica da remineralização de solos

Magda Bergmann

### 4. Principais litotipos e minerais com potencial para remineralização e condicionamento de solos no Grupo Serra Geral

Magda Bergmann

### 5. Zeólitas

Magda Bergmann  
Monica Mazzini Perrotta

### 6. Conclusões

Magda Bergmann

### 7. Referências Bibliográficas

Magda Bergmann  
Ana Lúcia Borges Fortes Coelho (Organização e Formatação)

## COLABORAÇÃO TÉCNICA

Andrea Sander  
Monica Mazzini Perrotta  
Oscar L. Bertoldo Scherer  
Ramon Darwin de Araújo

## REVISÃO ORTOGRÁFICA

Irineia Barbosa da Silva

## REVISÃO FINAL

Marcelo Esteves Almeida  
Ioná de Abreu Cunha  
Carla Klein

## PROJETO GRÁFICO/EDITORIAÇÃO

### Capa (DIMARK)

Washington José Ferreira Santos

### Miolo (DIEDIG)

Andréia Amado Continentino  
Agmar Alves Lopes

### Diagramação (SUREG-PA)

Alessandra Luiza Rahel

### Supervisão (SUREG-PA)

Oscar Luis Bertoldo Scherer

---

## FOTOS DA CAPA

Da esquerda para a direita:

1. Vista dos derrames do Grupo Serra Geral a partir do mirante da Rota do Sol, Itati;
2. Britel Mineração, Osório;
3. Pedreira José Inácio, Morro Alto, Maquiné;
4. Pedreira Concesul, Bento Gonçalves.

---

## Serviço Geológico do Brasil – CPRM

[www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)  
[seus@cprm.gov.br](mailto:seus@cprm.gov.br)

A945 Avaliação do potencial agromineral Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná no RioGrande do Sul : estado do Rio Grande do Sul / MagdaBergmann (org.). – Porto Alegre : CPRM, 2021.

1 recurso eletrônico : PDF ; il. – (Informe de Recursos Minerais. Série Insumos Minerais para Agricultura, nº 26

Avaliação dos Recursos Minerais do Brasil  
ISBN: 978-65-5664-161-4

1.Agrominerais. 2.Rio Grande do Sul. I. Bergmann, Magda (org.). II. Série.

CDD 631.8165

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Ana Lúcia B. F. Coelho CRB 10/840

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte.

# APRESENTAÇÃO

---

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) tem a satisfação de disponibilizar à comunidade geocientífica, aos empresários do setor mineral e à sociedade em geral, o Informe de Recursos Minerais, número 26, Agrominerais do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul, vinculado à **Ação Avaliação dos Recursos Minerais**.

Esta ação consiste em um conjunto de projetos que visam estimular a pesquisa e a produção mineral brasileira, com foco adicional no suprimento de matérias-primas essenciais para o desenvolvimento da infraestrutura e do agronegócio no Brasil. Parte dessa iniciativa está inserida no empreendimento **Minerais Estratégicos, Críticos e Agrominerais** e integra o projeto Avaliação do Potencial Agromineral do Brasil.

Neste sentido o SGB-CPRM apresenta o presente Informe Mineral, com o objetivo de fomentar o aproveitamento econômico de rochas próprias para emprego na agricultura, em alternativa ou complemento aos fertilizantes convencionais.

O Rio Grande do Sul ocupa o quarto lugar no Brasil enquanto exportador de *commodities*, além de deter a terceira posição dentre os estados produtores de cereais, leguminosas e oleaginosas.

O estado desfruta de posição estratégica no quadro nacional de oferta de diversos produtos agrícolas, como arroz, trigo e aveia, além de se destacar na produção de fumo, uva e maçã e, também, na pecuária.

Assim como os demais estados que lideram a produção agropecuária brasileira, o Rio Grande do Sul depende maciçamente da importação de insumos para fertilizantes destinados ao agronegócio e à agricultura familiar.

O presente informe mineral apresenta fontes de rochas do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná, que podem ser enquadradas nas categorias de remineralizadores de solos e fertilizantes simples, além de condicionadores e melhoradores de solos.

Por meio deste trabalho, o SGB-CPRM procura especialmente aproximar as cadeias produtivas da mineração de agregados para construção civil e da agricultura, apresentando resultados que podem promover o lançamento de subprodutos da mineração com uso agrícola.

**Esteves Pedro Colnago**

Diretor-Presidente

**Marcio José Remédio**

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

## RESUMO

---

O projeto Agrominerais do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul caracteriza o potencial agromineral da parte sul rio-grandense da província de basaltos continentais Paraná-Etendeka, de idade eocretácea. Os litotipos estudados compreendem rochas toleíticas vulcânicas e subvulcânicas como basaltos, andesitos basálticos e andesitos, com rochas ácidas e alcalinas subordinadas (dacitos, traquitos, riocacitos e riolitos). O trabalho reúne um banco de dados litoquímicos que totaliza 246 amostras distribuídas ao longo das diversas regiões geográficas da metade norte do estado, designadas como blocos Litoral, Região Central, Fronteira Oeste e Região Norte. As rochas são caracterizadas enquanto fontes potenciais para remineralizadores de solos, a partir dos critérios que a legislação de fertilizantes estabelece para esta categoria de insumos; ou para destinação a fertilizantes simples fontes de cálcio, magnésio ou potássio, e do elemento benéfico silício. Basaltos amigdaloides com cavidades mineralizadas a zeólitas e brechas com cimento calcítico foram apontados como fontes potenciais de condicionadores de solos, sendo empregados os métodos de espectroscopia de reflectância e difratometria de raios X para caracterização de minerais do grupo das zeólitas. A grande continuidade lateral dos derrames vulcânicos, assim como sua espessura, apontam para jazidas de insumos disponíveis em todos os blocos, com destaque do potencial de basaltos amigdaloides a zeólitas nos blocos litoral e central.

## ABSTRACT

---

*The following report presents results related to Serra Geral Group Agrominerals in Rio Grande do Sul project. This project was developed to characterize the agromineral potential of rocks from eocretaceous Paraná-Etendeka continental basalts province, in his southernmost area at Brazil. Prospected rocks include volcanic and sub-volcanic tholeiitic basalts, basaltic andesites and andesites, with subordinate acidic and alkaline rocks (dacites, trachytes, riodacites and rhyolites). Lithochemical databases are buildt for a set of 246 samples distributed throughout different geographical regions, as Litoral, Central Region, West Frontier and North Region domains blocks. Rocks has been characterized as potential sources for “soil remineralizers”, based on the brazilian fertilizer law criteria, or for use indication as “simple fertilizers”, sources of calcium, magnesium or potassium, plus beneficial element silicon. Amygdaloidal basalts with cavities mineralized to zeolites and basaltic flow’s upper crust breccias with calcitic cement were identified as potential sources of soil amendment materials, using reflectance spectroscopy and X-ray diffraction methods to characterize minerals in the zeolite group. The large lateral extension of volcanic flows, as well as their thickness, points to the occurrence of agrominerals deposits throughout domains, with emphasis to reserves of zeolitic amygdaloid basalts in the coastal and central domains.*

# SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA .....	8
1.2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO .....	9
<b>2. METODOLOGIA.....</b>	<b>10</b>
2.1. ABORDAGEM DA ÁREA DE PESQUISA E PROCEDIMENTOS DE CAMPO .....	10
2.2. ANÁLISES E ENSAIOS.....	10
2.2.1. Análises Petrográficas .....	10
2.2.2. Análises Litoquímicas .....	10
2.2.3. Análises por Microscopia Eletrônica de Varredura .....	10
2.2.4. Análises por Difractometria de Raios X.....	11
2.2.5. Análises por Espectroscopia de Reflectância (ER).....	11
<b>3. CONCEITUAÇÃO DE AGROMINERAIS E ROTA TECNOLÓGICA DA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS.....</b>	<b>12</b>
3.1. AGROMINERAIS E LEGISLAÇÃO .....	12
3.2. ADUBAÇÃO CONVENCIONAL COM FERTILIZANTES MINERAIS .....	12
3.3. REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS.....	13
3.3.1. Conceitos Básicos e Práticas da Técnica .....	13
3.3.2. Normas para Certificação de Remineralizadores de Solos .....	14
3.3.3. Rochas com potencial para remineralização de solos.....	14
3.4. CORREÇÃO DE ACIDEZ EM SOLOS .....	14
3.5. CERTIFICAÇÃO DE REMINERALIZADORES DE SOLOS NO RIO GRANDE DO SUL.....	15
<b>4. PRINCIPAIS LITOTIPOS E MINERAIS DO GRUPO SERRA GERAL COM POTENCIAL PARA REMINERALIZAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE SOLOS.....</b>	<b>16</b>
4.1. O GRUPO SERRA GERAL NA BACIA DO PARANÁ .....	16
4.1.1. Distribuição dos litotipos do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul.....	16
4.2. COMPARTIMENTAÇÃO DAS ROCHAS PESQUISADAS POR REGIÃO .....	18
4.2.1. Bloco Litoral.....	18
4.2.1.1. Geologia do Bloco Litoral e lavras visitadas .....	18
4.2.1.2. Tratamento dos dados litoquímico das rochas do Bloco Litoral .....	25
4.2.2. Bloco Central .....	25
4.2.2.1. Geologia do Bloco Central e lavras visitadas.....	25
4.2.2.2. Tratamento dos dados litoquímico das rochas do Bloco Central.....	32
4.2.3. Bloco Fronteira Oeste.....	32
4.2.3.1. Geologia do Bloco Fronteira Oeste e lavras visitadas .....	32
4.2.3.2. Tratamento dos dados litoquímicos das rochas do Bloco Fronteira Oeste.....	34
4.2.4. Bloco Região Norte.....	34
4.2.4.1. Geologia do Bloco Região Norte e lavras visitadas .....	34
4.2.4.2. Tratamento dos dados litoquímico das rochas do Bloco Região Norte .....	35
4.2.4.3. Resultados de ensaios agronômicos com basaltos e dacitos do Grupo Serra Geral .....	36
4.3. AQUECIMENTO GLOBAL E AGRICULTURA .....	37



# SUMÁRIO

---

<b>5. ZEÓLITAS .....</b>	<b>38</b>
5.1. PROPRIEDADES E USOS DOS MINERAIS DO GRUPO DAS ZEÓLITAS .....	38
5.2. OCORRÊNCIAS DE ZEÓLITAS EM BASALTOS E DACITOS DO GRUPO SERRA GERAL.....	38
5.3. COMPARTIMENTAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS DE ZEÓLITAS EM BASALTOS AMIGDALOIDES NO RIO GRANDE DO SUL.....	39
5.4. DISCUSSÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICOS .....	44
5.5. RESULTADOS ANALÍTICOS .....	45
5.5.1. Espectroscopia de Reflectância (ER) Aplicada à Identificação e Zeólitas no Grupo Serra Geral.....	45
5.5.1.1. Feições Espectrais Diagnósticas das Zeólitas .....	46
5.5.1.2. Resultados - Identificação Mineral.....	48
5.5.1.3. Discussão e Conclusão .....	51
5.5.2. Difratomia de Raios X .....	52
5.6. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO.....	54
5.6.1. Cuidados na Tomada das Fotos para Classificação de Imagens .....	54
5.6.2. Classificação de Imagens .....	55
5.7. POSSIBILIDADES DO USO DE ZEÓLITAS DO GRUPO SERRA GERAL NA AGRICULTURA .....	55
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>60</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O Projeto Agrominerais do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul foi desenvolvido para a pesquisa de fontes alternativas de nutrientes agrícolas e corretivos de solos provenientes das rochas vulcânicas que constituem o substrato rochoso da metade norte do estado.

A pesquisa integra o projeto Avaliação do Potencial Agromineral do Brasil, que tem por objetivo o levantamento e a avaliação de fontes de minerais e rochas para emprego na técnica de remineralização e condicionamento de solos em todo o território nacional, com ênfase em materiais disponíveis em pilhas de descartes de mineração.

O Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro tem uma forte participação do agronegócio, e o país ocupa uma posição de destaque na produção mundial de grãos, cana-de-açúcar, produtos florestais e biocombustíveis, assim como na exportação de produtos pecuários.

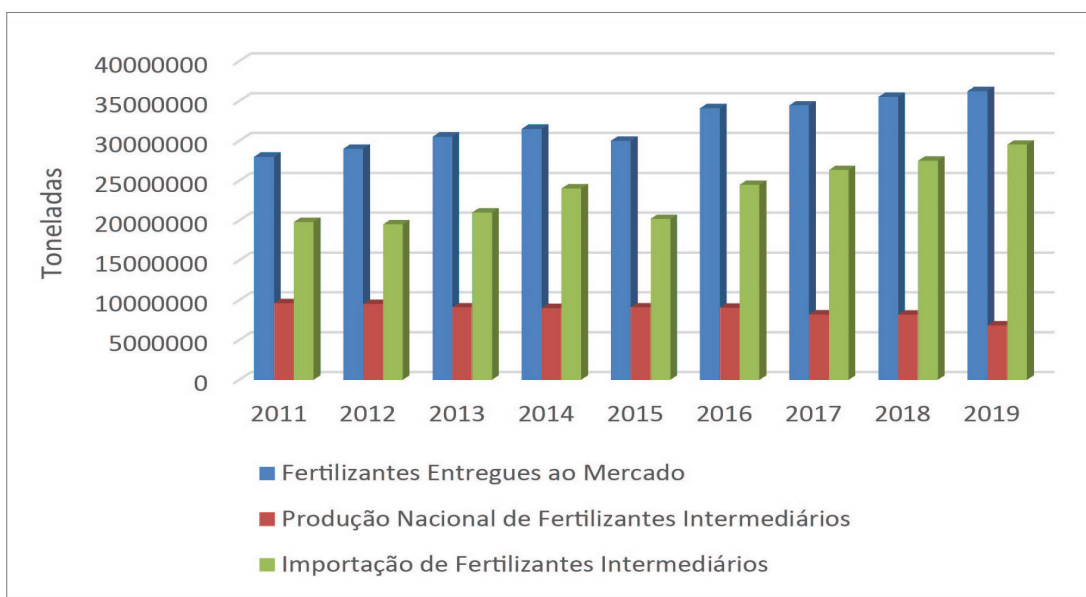
A demanda de mercados como China, países árabes e a União Europeia, bem como o crescimento do consumo interno, vem expandindo a atividade agropecuária, constatando-se uma forte pressão sobre as florestas brasileiras. O aumento da produtividade nas terras agriculturáveis pode ser uma resposta a esta pressão e é diretamente ligado ao uso intensivo de fertilizantes.

Dentro deste quadro, o Brasil é um país agrícola com elevada dependência externa de insumos para fertilizantes, em especial potássio (K), enxofre (S) e nitrogênio (N). A dependência mais crítica dá-se pela importação do K, sendo que o país importa mais de 90% da matéria-prima para fertilizantes potássicos, e sua única mina se aproxima do final das reservas (Mina de Taquari/Vassoura, municípios de Rosário do Catete e Capela - SE).

A Figura 1.1, elaborada a partir de dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2020) mostra como evoluíram a importação e a produção dos fertilizantes intermediários, que são os produtos inorgânicos utilizados na formulação dos adubos, bem como a produção entregue ao mercado ao longo dos últimos oito anos, evidenciando que os custos de importação dos componentes minerais dos adubos promovem forte impacto na balança comercial do país.

Por outro lado, a grande geodiversidade do território brasileiro garante que a quase totalidade dos estados, embora em diferentes graus, conte com rochas adequadas para remineralização e condicionamento de solos, principalmente se próximas das áreas de produção agrícola.

As rochas vulcânicas da Bacia do Paraná, inseridas no Grupo Serra Geral de idade eocretácica, constituem uma província ígnea de extensão continental e têm ampla



**Figura 1.1** - Quadro da importação e da produção dos fertilizantes intermediários. Fonte: ANDA-Associação Nacional para Difusão de Adubos [www.anda.org.br](http://www.anda.org.br). Consulta em 30/05/2020.

distribuição pelos estados das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, estendendo-se pela Argentina, Uruguai e Paraguai. O uso empírico de basaltos e dacitos do Grupo Serra Geral, na forma de finos de britagem, é bastante difundido na agricultura familiar e entre aos produtores orgânicos certificados e vem crescendo nas últimas décadas nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil.

A disponibilidade decorre da mineração de agregados para a construção civil, na forma de brita, pedras de calçamento, lajes e materiais para pavimentação de estradas. O beneficiamento desses materiais gera um excedente de finos de britagem, que é comercializado como *filler* para asfalto, o que, em paralelo, vem levando várias empresas do ramo a se interessarem pela possibilidade de lançamento de produtos do tipo Remineralizadores de Solos.

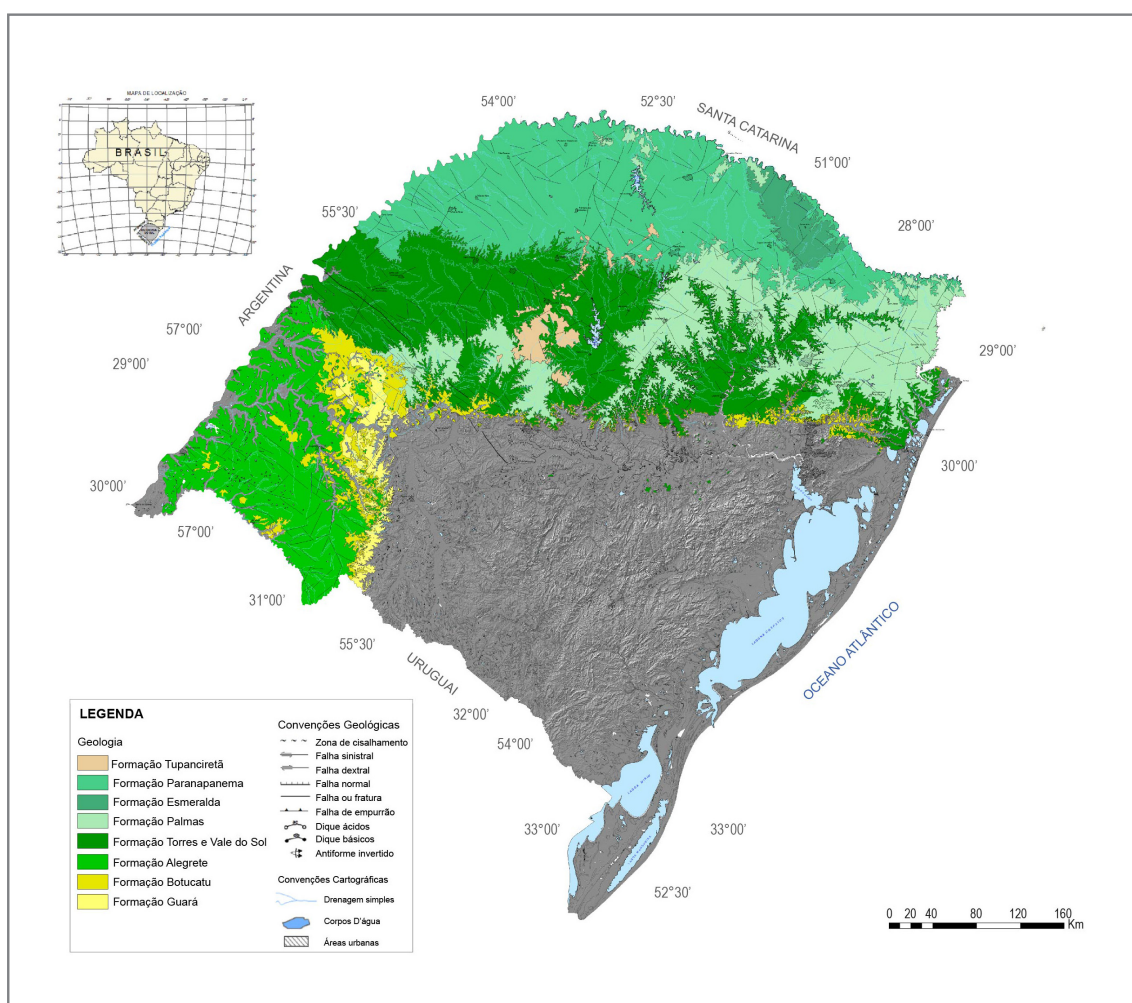
A produção de areia de brita, também conhecida como areia industrial, é mais um processo que causa aumento na geração de finos de britagem na indústria de agregados. Sua obtenção, a partir da britagem de basaltos

e dacitos em moinhos VSI (*vertical shaft impactor*) tende a ser incrementada em especial no Rio Grande do Sul, em decorrência dos impedimentos ambientais para lavra de areia na rede hídrica. Adicionalmente, a metade norte do estado, onde predominam os terrenos vulcânicos da Bacia do Paraná, é carente de areias com composição e granulometria própria para emprego em concreto.

Outros materiais de interesse estão disponíveis na forma de numerosas ocorrências, ora de zeólitas, em basaltos amigdaloides associados a lobos de derrames, ora de calcita, em brechas de topos de derrames basálticos do Grupo Serra Geral. Em ambos os casos com teores que podem constituir jazidas.

## 1.2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O trabalho abrangeu a área do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul (RS), que se estende por aproximadamente 72.000 km<sup>2</sup> (Figura 1.2).



**Figura 1.2** - Mapa de localização da área do Grupo Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul, adaptado do Mapa Geológico 1:750.000 (WILDNER et al., 2008).

Os acessos aos diferentes locais que foram pesquisados incluem as principais rodovias da região central e da metade norte do Rio Grande do Sul (Figura 1.3):

- BR 290 e a BR 101, que dão acesso ao litoral norte do RS, e BR 453, Rota do Sol, que conecta a cidade de três Cachoeiras à Serra Gaúcha e ao oeste do estado.

- BR 116 e RS 20 e 324, que cobrem a região centro-leste do RS.
- BR 386, BR 158 e RS 135, que dão acesso ao extremo norte e nordeste do RS.
- BR 285 e RS 344 e 155, que percorrem a região noroeste do RS.
- BR 290, 293 e 472, que promovem a circulação nas regiões sudoeste e oeste do estado.

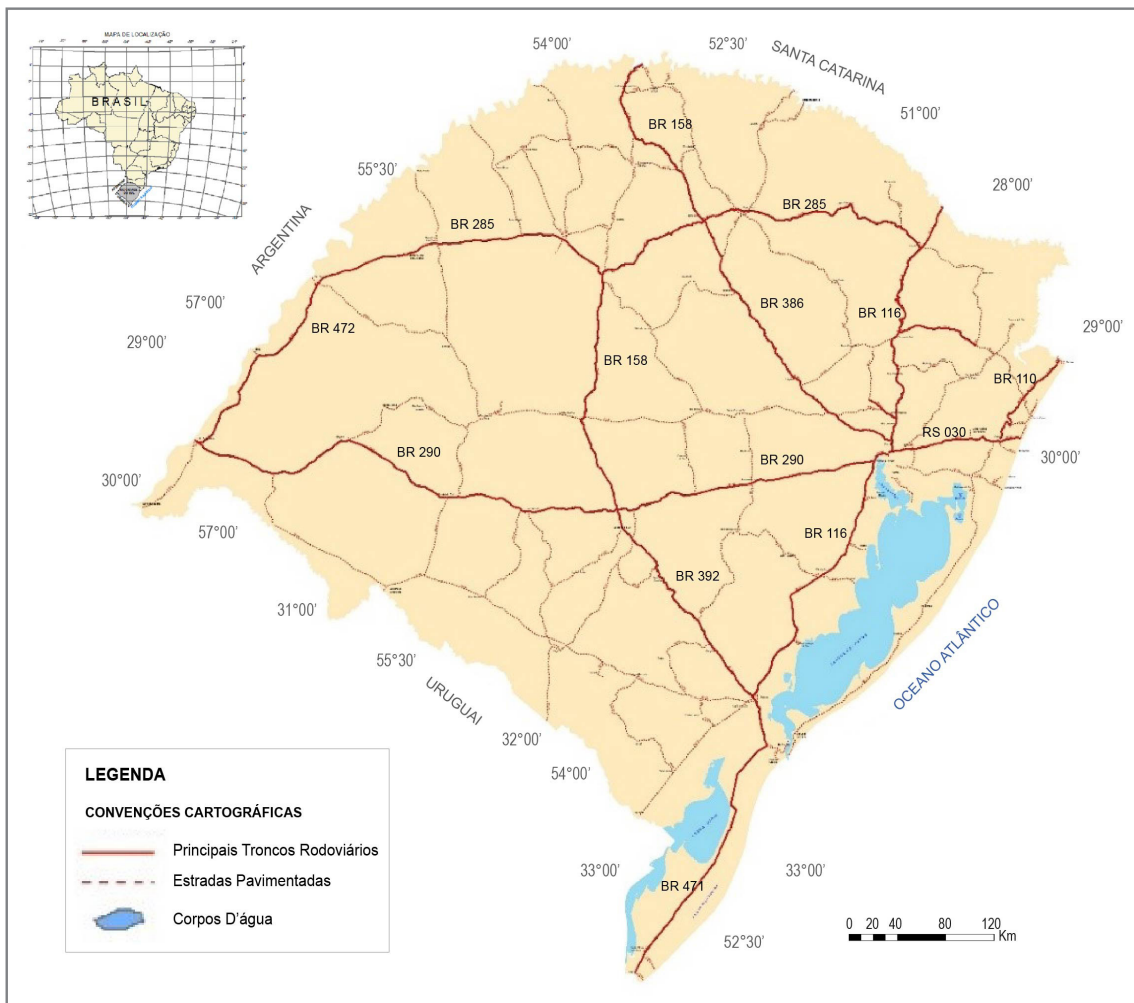


Figura 1.3 - Acessos rodoviários da área do projeto. Fonte: (DNIT, 2019).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. ABORDAGEM DA ÁREA DE PESQUISA E PROCEDIMENTOS DE CAMPO

O levantamento de campo foi executado em dez etapas, entre os meses de julho de 2012 e junho de 2014. Algumas visitas a lavras e afloramentos localizados foram retomadas com a finalidade de coletar quantidades maiores de amostras de rochas, finos de britagem e zeólitas para ensaios agronômicos e tiveram a participação do grupo de agrônomos da Embrapa Clima Temperado, envolvidos no plano de trabalho conveniado com esta entidade.

O foco do trabalho de campo incidiu em dois objetivos principais: a pesquisa de rochas para emprego em remineralização de solos e o levantamento de materiais geológicos próprios para condicionamento de solos, como zeólitas em basaltos amigdaloides e calcita em brechas de crosta superior de derrames. Também foram investigadas algumas ocorrências de vidros vulcânicos de composição ácida quanto ao potencial expansivo (queima para obtenção de perlitas).

As rochas para remineralização de solos foram pesquisadas por região do Rio Grande do Sul, considerando a distribuição entre litotipos fontes de Ca, Mg e Si (basaltos sensu lato) e fontes de K (dacitos). Foram ainda visitados 34 empreendimentos mineiros, na maioria operando com extração de agregados para a construção civil. Algumas empresas informaram de maneira consistente dados de produção, além de equipamento básico e infraestrutura. Desta maneira, pôde-se contar com estimativas de disponibilidade de finos de britagem.

Os trabalhos em afloramentos e pedreiras foram conduzidos com desenho de croquis e montagem de perfis. A análise e descrição macroscópica de rochas foram efetuadas com uso de lupa de mão, para identificação mineral, e de ácido clorídrico 10%, para investigação da presença de carbonatos.

A descrição de zeólitas em basaltos amigdaloides teve sua primeira etapa durante os trabalhos de campo, por meio de análises macroscópicas e estabelecimento de sequência de formação de minerais em cavidades. A estiva de quantidade de zeólitas foi apoiada em afloramento por uso de cartas de percentuais, sendo registradas as dimensões e os formatos das cavidades preenchidas nos basaltos, assim como a espessura e a continuidade lateral dos níveis mineralizados. Em laboratório, foram

empregados métodos de quantificação, como contagem de área de zeólitas em imagens processadas com o software ENVI, em amostras selecionadas cortadas em duas dimensões.

### 2.2. ANÁLISES E ENSAIOS

#### 2.2.1. Análises Petrográficas

Um total de 96 lâminas petrográficas de rochas foi confeccionado no laboratório de preparação de amostras do SGB-CPRM, na Superintendência Regional de Porto Alegre. As lâminas foram descritas pela petrógrafa Andréa Sander, com uso de microscópio Nikon Eclipse 50iPOL (com aumentos variando entre 25 e 500 vezes), utilizando técnicas de luz polarizada plana e luz polarizada cruzada. Fotomicrografias foram obtidas com uso de câmara Canon A640, de 10 megapixels acoplada.

#### 2.2.2. Análises Litoquímicas

As análises litoquímicas foram realizadas pelo Laboratório ACME (Canadá), pelos métodos plasma indutivo acoplado (ICP) para óxidos maiores e por espectrometria de massa (ICP-MS) para oligoelementos. O total das análises perfaz resultados para 86 amostras, sendo 48 de rochas basálticas, 19 de rochas vulcânicas ácidas e 19 de basaltos amigdaloides e brechas.

#### 2.2.3. Análises por Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas com um microscópio Zeiss LS15 em modo de alto vácuo (<10<sup>-4</sup> Pa), no laboratório SEM da Superintendência Regional do SGB-CPRM, em Belém. Grãos de zeólita montados em *stubs* e lâminas de basaltos amigdaloides foram revestidos com ouro, com 20 µm de espessura, e fotografados. *Secondary Electron* (SE) imagens de grãos foram tomadas com aceleração de tensão de 17,5 Kv, sonda atual de 3-7pA, trabalhando distância (WD) de 9 mm e ampliação entre x200 e x3000. As imagens de cristais de retrodispersão (BSE) em seções finas foram obtidas com tensão de aceleração de 20 Kv, corrente de sonda de 70-100 pA, distância de trabalho (WD) de 8,5 mm e ampliação entre x60 e x1500.

A composição química dos minerais foi analisada por espectrometria de energia dispersiva (EDS), com detector de deriva de silício de 10mm<sup>2</sup> de área. As análises de EDS, no modo de ponto, foram realizadas com tensão de aceleração de 20Kv, corrente de 120 a 300pA, WD de 8,5mm. Os resultados da EDS foram padronizados por espectros de energia padrão do software AZTec da Oxford Instruments. Resultados com desvio padrão > 10% da concentração do elemento foram descartados do cálculo da composição mineral, pois talvez sejam devidos ao efeito do tamanho do ponto ou às impurezas aprisionadas no retículo cristalino.

#### 2.2.4. Análises por Difratometria de Raios X

A difratometria de raios X foi realizada em zeólitas puras selecionadas de cavidades, em um total de 20 amostras, separadas no laboratório de petrografia do SGB-CPRM/PA. As amostras foram analisadas com difratômetro SIEMENS, modelo D5000, ano 1992, com  $\theta$ - $\theta$  goniômetro e radiação  $K\alpha$ , tubo de cobre em 40 kV / 25 mA, no Instituto de Geociências da UFRGS.

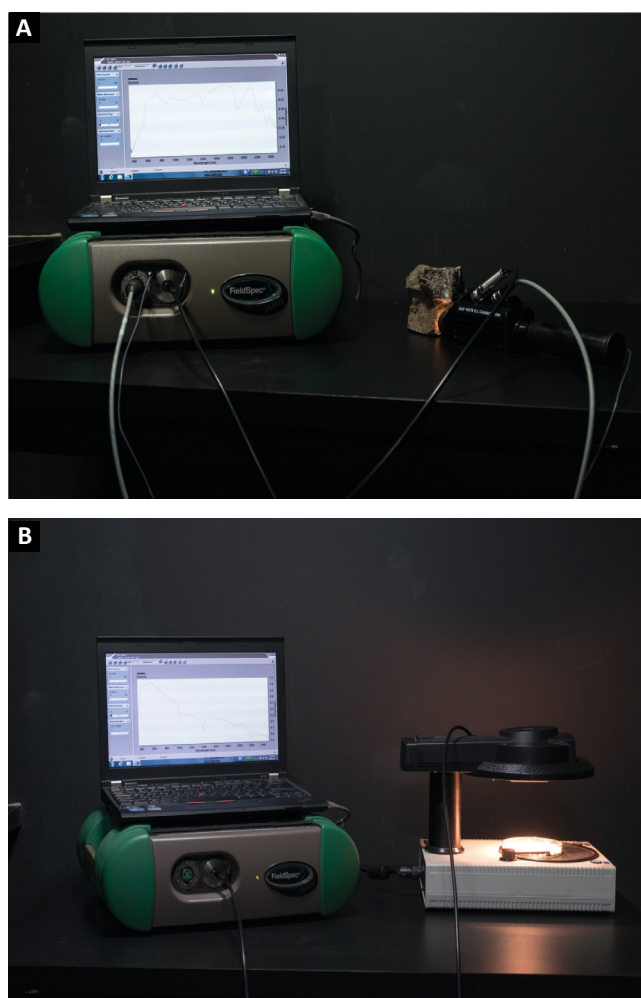
#### 2.2.5. Análises por Espectroscopia de Reflectância (ER)

No Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico e Espectroscopia Mineral (LABSERGEM-DISEGE/CPRM-SP) foram realizadas análises por espectroscopia de reflectância de 116 amostras minerais do grupo das zeólitas, na forma de concentrados de fragmentos extraídos de amígdalas e brechas ou diretamente sobre cavidades preenchidas em amostras de rochas basálticas.

O espectrorradiômetro utilizado foi o ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution, que tem alcance espectral entre os comprimentos de onda de 350 e 2.500 nm, isto é, do visível ao infravermelho de ondas curtas; resolução espectral de 3 nm (em 700 nm), 8,5 nm (em 1.400 nm) e 6,5 nm (em 2.500 nm) e um total de 2.151 bandas espectrais. Para a coleta dos espectros utilizou-se, no caso de amostras de rocha, uma sonda de contato com fonte de luz e fibra óptica acoplada (Figura 2.1.A). No caso dos concentrados de fragmentos minerais, as medidas foram feitas por meio do instrumento denominado *turntable* (Figura 2.1.B), que acopla a fonte de luz, a fibra óptica e uma plataforma giratória, base para uma placa de Petri preenchida com o material. As medidas são registradas em valores de reflectância proporcional relativa a uma referência padrão branca de máxima reflectância difusa (do tipo *Spectralon*). As análises espectroscópicas de reflectância geram assinaturas espectrais sob a forma de curvas da variação da intensidade da reflectância, conforme o comprimento de onda dentro do intervalo

de luz refletida do espectro eletromagnético. Essas assinaturas desenham feições resultantes da absorção da energia eletromagnética da luz, em comprimentos de onda específicos, por causa de processos eletrônicos e vibracionais no nível atômico ou molecular dentro da estrutura mineral. Posições e formas destas feições são características e, portanto, diagnósticas de determinadas fases minerais e também de suas variações composicionais.

A interpretação espectro-mineralógica das curvas espectrais obtidas, a determinação da posição, a profundidade das feições de absorção e outros parâmetros espectrais foram realizados com auxílio dos *softwares* ENVI© (versão 5.4 ou superior) e TSG (*The Spectral Geologist*). A discriminação das fases minerais presentes foi feita por comparação das feições de absorção no espectro analisado com feições similares de minerais da biblioteca espectral do USGS (*United States Geological Survey*) (KOKALY et al., 2017), utilizada como referência.



**Figura 2.1** - (A) Espectrorradiômetro ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution com sonda de contato acoplada; (B) Espectrorradiômetro com *turntable* (plataforma giratória) acoplada.

## 3. CONCEITUAÇÃO DE AGROMINERAIS E ROTA TECNOLÓGICA DA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS

### 3.1. AGROMINERAIS E LEGISLAÇÃO

O termo agrominerais designa, genericamente, minerais e rochas com potencial de emprego em práticas agrícolas. Encontram-se nesta categoria tanto as fontes intermediárias para a fabricação de fertilizantes solúveis (rochas fosfáticas, sais de potássio) como materiais destinados à correção de acidez (rochas carbonáticas) ou capazes de incrementar as propriedades físicas em solos (zeólitas, turfas) e, mais recentemente, os remineralizadores de solos.

O uso de rochas cominuídas na agricultura familiar já ocorre há várias décadas no Brasil, mas passou a ser regulamentado com a inclusão dos remineralizadores na categoria de insumo destinado à agricultura. Isto resultou de uma ampla articulação política e técnica entre órgãos de pesquisa e o legislativo brasileiro, que propiciou que fosse alterada a Lei dos Fertilizantes (Lei Nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980).

Desta maneira, criada e aprovada a Lei Nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013, os remineralizadores de solos ficaram definidos na legislação dos fertilizantes como “material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou a atividade biológica do solo”.

Por fim, as Instruções Normativas do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (Mapa) IN 05 e 06/2016 (BRASIL 2016), regulam os remineralizadores de solos com a delimitação de parâmetros de compostos nutrientes, limites de elementos potencialmente tóxicos (EPT), e de minerais inertes, como o quartzo.

Os corretivos de solos são regulados pelas Instruções Normativas do MAPA 35/2006 e IN 27/2006.

### 3.2. ADUBAÇÃO CONVENCIONAL COM FERTILIZANTES MINERAIS

As necessidades nutricionais das plantas abrangem 16 elementos essenciais, que desempenham funções distintas na fisiologia vegetal, e que são supridos através do substrato (solo), da água ou da atmosfera (MALAVOLTA

1980, 2008). Os macronutrientes, que se caracterizam por serem absorvidos em maior quantidade, são oxigênio (O), hidrogênio (H) e carbono (C); aportados principalmente pela água e pelo ar, e nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), provenientes de soluções que percolam os solos. Os três primeiros regulam a fotossíntese e o suprimento de água e na forma de  $H_2O$  e  $CO_2$  e fazem parte da maioria dos compostos nutrientes. Os demais são constituintes de proteínas, de paredes de células, tomam parte na produção de clorofila (N, Mg) e atuam como ativadores enzimáticos (Mg) ou são imprescindíveis em funções regulatórias, como o K.

Os micronutrientes são absorvidos em pequenas quantidades. Nesta categoria constam os elementos boro (B), o íon cloreto (Cl<sup>-</sup>), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), selênio (Se) e zinco (Zn), que são reguladores de diversas atividades metabólicas, como translocação de açúcares, fotossíntese e produção de enzimas. Outros elementos, como o silício, são considerados elementos benéficos, que embora não sejam nutrientes, desempenham papel importante na estrutura das plantas, em especial das gramíneas (MALAVOLTA, 2008; VAN STRAATEN, 2007).

No método de adubação convencional com fertilizantes minerais, os macronutrientes N, P e K são supridos através de formulações como fertilizantes simples (composto químico único, com um ou mais nutrientes, como o KCl), fertilizantes mistos (mistura contendo no mínimo dois dos nutrientes N, P e K) ou fertilizante complexos, que misturam matérias-primas, resultando em dois ou mais compostos.

Os teores de fertilizantes do tipo NPK são expressos em razões como 10-10-10 ou 20-20-20, que representam os teores em percentual de N,  $P_2O_5$  e  $K_2O$  e, usualmente, não apresentam nutrientes secundários ou micronutrientes.

Alguns fertilizantes minerais são rochas que passaram apenas por cominuição, casos do fonolito e do composto natural de folhelho carbonoso com carbonato de cálcio e magnésio. Essas duas rochas moídas não atendem à categoria dos remineralizadores de solo, mas ao apresentarem eficiência agrônômica foram incluídas na categoria dos fertilizantes minerais simples. A relação

das matérias-primas consideradas fertilizantes minerais simples pode ser encontrada na Instrução Normativa no 39 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2018 (Anexo I - Especificações dos fertilizantes minerais simples, da IN 39 de 08 de agosto/2018) e é atualizada com regularidade pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), contemplando a inclusão de novos materiais nesta categoria.

### 3.3. REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS

#### 3.3.1. Conceitos Básicos e Práticas da Técnica

Em uma rota diversa, a remineralização de Solos, também conhecida como Rochagem (*Rocks for Crops* ou *stone meal* em inglês), consiste na aplicação de rochas moídas no solo, técnica que visa recompor a fração de minerais intemperizáveis portadores de nutrientes importantes para as plantas (VAN STRAATEN, 2007), e foca o suprimento de elementos macronutrientes (K, P, Ca, Mg, S), micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe,) e elementos benéficos (Si).

Os conceitos da técnica de rochagem foram introduzidos no Brasil por Leonardos *et al.* (1976), e se encontram expostos em trabalhos como o de Theodoro; Leonardos (2015), e Manning; Theodoro (2020) entre outros.

A premissa para uso agrícola de minerais e rochas apenas cominuídos é que estes elementos se encontrem em estruturas minerais que permitam sua liberação por intemperismo e que sejam capazes de disponibilizar os nutrientes ao tempo do ciclo das culturas.

A avaliação das carências nutricionais dos solos deve ser feita através de análises próprias e, de maneira geral, é necessário considerar que cada cultura apresenta demandas de nutrição particulares em relação a diferentes solos. Em experimentos agrônômicos, assim como em produção agrícola, a quantidade de remineralizadores a ser empregada é obtida através de cálculos que consideram os teores de nutrientes em solos e nas rochas e o que será demandado/exportado para a cultura em questão, a exemplo do cálculo feito para fertilizantes convencionais.

Como os teores de nutrientes em rochas são de ordem bastante inferior aos dos fertilizantes solúveis, a quantidade de remineralizadores a ser aplicada atinge usualmente entre quatro e oito toneladas/hectare (t/ha), o que torna essencial empregar rochas que se encontrem mais próximas o possível das áreas agrícolas, de maneira a viabilizar economicamente o método e não onerar o insumo com o transporte por longas distâncias. A depender da região, a distância não deve ultrapassar 200 km, mas em estados como Goiás já se conhece casos de uso de remineralizadores transportados por 400 km ou mais. É necessário também determinar a granulometria mais

própria para a moagem, através da petrografia, com estudo de lâminas de rochas ao microscópio ótico. A determinação das faixas de tamanho de grãos das rochas permite que a cominuição seja adequada para que se promova a quebra dos minerais, obtendo fragmentos ao invés de grânulos com vários minerais. Isto é, especialmente, importante para as rochas vulcânicas, que na maioria das vezes têm granulação fina. As técnicas de petrografia ainda identificam os minerais presentes nas rochas, permitindo que se determine em quais fases minerais estão alocados os nutrientes, além de investigar texturas, que podem ser indicativas de maior ou menor reatividade em solos (BERGMANN *et al.*, 2014).

Os remineralizadores são, com frequência, empregados conjuntamente a matéria orgânica (STANFORD, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2013) e também cresce a formulação de fertilizantes organominerais, pois a reatividade em solos é implementada por micorrizas e microrganismos (CARVALHO *et al.*, 2013) que têm papel importante na própria formação dos solos através da produção de ácidos orgânicos.

Como são insumos provenientes de rochas silicáticas, os remineralizadores de solos tendem a ter uma maior variedade de nutrientes secundários e micronutrientes em relação aos fertilizantes solúveis. A liberação gradual dos nutrientes propicia que os mesmos sejam aproveitados pelas plantas, minimizando as chances de que sejam lixiviados do solo em função de chuvas ou mesmo da irrigação. Isto contribui para evitar a poluição dos recursos hídricos, bem como a eutrofização em consequência da oferta de nutrientes na água.

Em outro viés de controle e preservação ambiental, deve-se considerar que a agricultura, os cultivos florestais e outros usos do solo respondem globalmente por 22% das emissões de gases-estufa. Isto está em parte relacionado à emissão de CO<sub>2</sub> e de práticas de correção de acidez em solos com uso de rochas carbonáticas. A aplicação de rochas silicáticas, em especial os basaltos, atua igualmente na elevação do pH dos solos e constitui alternativa às práticas de calagem (ver item 3.4).

No mesmo contexto, o uso de remineralizadores vem sendo apresentado por diversos trabalhos recentes como um processo global eficiente para a captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, embora em escala de tempo geológico. Isto se dá através de um processo que vem sendo conceituado como *Enhanced Weathering*, (BEERLING *et al.*, 2018; GONZALES; ILYNA, 2016; LEFEBVRE *et al.*, 2019). De maneira resumida, o intemperismo aprimorado envolve a aplicação de rochas ricas em minerais silicatados de Ca ou Mg pulverizadas no solo, de forma a possibilitar o intemperismo de grandes volumes desses minerais. As reações desencadeadas pelos processos intempéricos consomem CO<sub>2</sub> e promovem a liberação de cátions como o Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, que são em parte absorvidos pelas



plantas, e em parte carregados para os cursos de água. Ao aportarem os cátions aos oceanos, os rios promovem finalmente uma intensificação da alcalinidade, o que por sua vez favorece a proliferação de organismos, como diatomáceas, foraminíferos, corais e outros que constroem carapaças carbonáticas, sequestrando CO<sub>2</sub> atmosférico.

Autores como Kramer e Chadwick (2016, 2018) ressaltam o papel do alumínio e do ferro, minerais reativos presentes no solo, na absorção de matéria orgânica e com potencial para armazenamento de carbono em longo prazo. O processo é responsável por entre 3 e 72% do carbono orgânico encontrado em solos minerais, a depender do clima, e é especialmente importante em biomas florestados de clima úmido.

### 3.3.2. Normas para Certificação de Remineralizadores de Solos

As Instruções Normativas (IN) do Ministério da Pecuária e Agricultura 05 e 06/2016 especificam teores mínimos de compostos nutrientes, definido como “Soma de Bases”. Esse parâmetro corresponde ao somatório dos óxidos de cálcio, magnésio e potássio (CaO+MgO+K<sub>2</sub>O) e deve ser igual ou superior a 9% em peso, sendo o teor mínimo de 1% requerido para o óxido K<sub>2</sub>O. Os valores declarados para soma dos óxidos têm tolerância de até 10% (dez por cento) para menos, não podendo ultrapassar 1,5 unidades.

Pela normativa, ficou instituído o limite de 25% em volume de quartzo, referido como “sílica livre”. A restrição tem o objetivo de limitar o conteúdo de minerais inertes, que, se adicionados ao solo na quantidade prevista pela prática, podem ao longo do tempo atingir concentração indesejada, ocupando o espaço de minerais úteis. A tolerância para excesso é de 20% a mais.

Quanto aos limites de elementos potencialmente tóxicos (EPT), a IN MAPA 05/2016 regula os limites máximos de metais pesados, como arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb), cujos teores máximos permitidos encontram-se expressos na Tabela 3.1.

Embora elementos como o cromo (Cr) e o níquel (Ni) não sejam regulados pela IN MAPA 05/2016, requerem atenção nos remineralizadores de solos. O cromo é encontrado nos minerais no estado trivalente (Cr<sup>3+</sup>), espécie que atua como micronutriente e que tem papel importante na metabolização da glicose pelas plantas. No entanto, o Cr é altamente tóxico quando oxidado ao estado hexavalente (Cr<sup>6+</sup>). Embora as condições de pH/eH relatadas à passagem das formas de Cr ao estado hexavalente não sejam comuns no ambiente dos solos brasileiros e a ocorrência de Cr nesta valência seja relacionada à poluição antrópica e atividades industriais, o uso de rejeitos de beneficiamento de minérios, como as

polpas, deve ser precedido de investigação cuidadosa e de análises de especiação do Cr.

Adicionalmente, a IN MAPA 06/2016 (BRASIL 2016) regulamenta as embalagens e formas de apresentação dos produtos do tipo remineralizadores de solos.

**Tabela 3.1** - Limites de elementos potencialmente tóxicos em remineralizadores de solos, segundo a IN 05/2016.

EPT	IN 05/2016 (PPM)
Arsênio (As)	15
Cádmio (Cd)	10
Mercúrio (Hg)	0,1
Chumbo (Pb)	200

### 3.3.3. Rochas com potencial para remineralização de solos

A Tabela 3.2 ilustra os litotipos com maior potencial para emprego na prática de remineralização de solos, listando os nutrientes, micronutrientes e elementos benéficos aportados por cada tipo de rocha.

Dentre as rochas listadas os basaltos e dacitos do Grupo Serra Geral já contam com uso na região sul do Brasil. Há mais de uma década essas rochas são empregadas empiricamente na agricultura familiar e por produtores orgânicos certificados. Recentemente, o uso tem se expandido para as regiões centro-oeste e sudeste.

Particularmente, na metade norte do Rio Grande do Sul, o uso empírico de basaltos e dacitos da Formação Serra Geral na agricultura familiar e entre os produtores orgânicos certificados decorre de sua disponibilidade como finos de britagem, enquanto subprodutos da mineração de agregados para a construção civil.

Como decorrência de seu substrato geológico, que corresponde às rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, essa região tem carência generalizada de areia natural na granulometria apropriada para concreto, o que leva ao incremento da produção de areia de britagem.

Como o frete responde por cerca de 60 a 70% do preço da areia, o maior custo de produção é compensado pela redução do custo do frete.

## 3.4. CORREÇÃO DE ACIDEZ EM SOLOS

Condicionadores de solo são, segundo a EMBRAPA - Agência Embrapa de Informação Tecnológica (2017), insumos que melhoram os atributos físicos, físico-químicos e biológicos do solo e atuam, entre outras formas, corrigindo a acidez e implementando a capacidade de troca de cátions e a estrutura do solo.

**Tabela 3.2** - Alguns dos minerais e rochas brasileiras com potencial e/ou uso corrente em remineralização de solos e nutrientes disponibilizados. (Fonte: 1) Knapik, 2007; 2) Bamberg *et al.*, 2011; 3) Bergmann *et al.*, 2013; 4) Theodoro, 2000; 5) Grecco *et al.*, 2012; 6) Ramos *et al.*, 2013; 7) Millech *et al.*, 2013; 8) Bamberg *et al.*, 2013; 9) Franco *et al.*, 2013; 10) Luz *et al.*, 2013; 11) Pereira *et al.*, 2007; 12) Tavares *et al.*, 2010; 13) Batista *et al.*, 2013; 14) Souza *et al.*, 2013; 15) Silva *et al.*, 2010; 16) França *et al.*, 2013; 17) Aguiar *et al.*, 2013; 18) Dos Anjos, 1991; 19) Assmann *et al.*, 1999; 20) Nicolini *et al.*, 2011; 21) Grecco *et al.*, 2013.) Adaptado de Blaskowski, Bergmann e Cavalcanti (2016).

MINERAIS E ROCHAS PORTADORES DE MACRO E MICRONUTRIENTES	
ROCHA/MINERAL	NUTRIENTES
Gipsita	S,Ca
Basalto/Gabro	Mg, Ca, Cu, Mn, Zn, Si (*1, 2, 3)
Kamafugito	K, P, Ca, Mg, Ni, Cr, Si (*4)
Dacitos	K, Na, Cu, Zn, Si (*5, 6)
Rochas graníticas à biotita	K, Ca, Mg (*2, 7, 8)
Carbonatito	P, Ca, Mg (K)
Fonolitos	K, Si, Na (*9, 10)
Rochas ultrabásicas	Mg, Ca, Si, Ni, Cr (*11)
Serpentinitos	Si, Ca, Mg, Fe, Na, Ni (K) (*12)
Biotita Xisto	K, Na, Fe, Ca, Mg (*13, 14)
Flogopititos	Ca, Mg
Mármore/Calcário/Dolomito	S, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn
Folhelho Pirobetuminoso	(*8, 18, 19, 20, 21)

A correção de acidez em solos é necessária para que as plantas possam se beneficiar da adubação e costuma ser conduzida antes dela.

Os minerais silicáticos presentes nos remineralizadores podem atuar igualmente na reação com os radicais ácidos em solos. Ao contrário do processo que ocorre com emprego de rochas carbonáticas, a ação neutralizante dá-se pela reação do ânion hidroxila (OH) com o cátion H<sup>+</sup> ou Al<sup>3+</sup>, sem que ocorra a liberação de gás carbônico, e, conseqüentemente, sem emissão de gases-estufa.

### 3.5. CERTIFICAÇÃO DE REMINERALIZADORES DE SOLOS NO RIO GRANDE DO SUL

Setores da indústria de mineração, como o de agregados para a construção civil, principiam a projetar esta demanda. Como já citado, muitas lavras de brita já comercializam informalmente há anos os finos de britagem para uso agricultura familiar e para a produção de vegetais orgânicos, mas, além da regulamentação dos produtos, todo um conjunto de fatores é propiciatório para

o desenvolvimento e popularização do uso dos novos insumos. O primeiro é ligado a custos de produção e segue alimentado pela situação cambial do país. Esse fator é responsável pelo interesse que o agronegócio passou a demonstrar sobre as novas técnicas e pode sozinho implementar drasticamente a escala de demanda dos produtos remineralizadores de solo. No entanto, fatores estruturantes, como a demanda de ordem global por práticas agrícolas mais limpas e pela produção de alimentos mais saudáveis, seguem sendo de igual importância. Por fim, em uma era onde a palavra de ordem é a produção sustentável, a perspectiva de agregar novos produtos à mineração, bem como diminuir a geração de descartes, situa a rochagem como uma técnica com amplas perspectivas. Não é por outro motivo que já se presencia a articulação de empresas do setor mineral em torno do desenvolvimento de produtos a partir de rochas silicáticas e outras. Isto acontece em especial nas Regiões Sul e Centro-Oeste, onde núcleos de pesquisa conveniados do SGB-CPRM e da EMBRAPA vêm desenvolvendo trabalhos de prospecção (atributo principal do SGB-CPRM nesta parceria), bem como propondo e executando protocolos agrônômicos para validação do desempenho de agrominerais. Embora permaneçam vários desafios para a pesquisa, muitas rochas já têm desempenho comprovado na remineralização de solos por avaliação agrônômica e novas rotas tecnológicas vêm sendo testadas, como a implementação de solubilidade por processos biológicos (inoculação por micorrizas); processos físicos, como tratamento térmico; e por processos químicos ou mistos, como a granulação de misturas de materiais orgânicos e pó de rocha com diferentes fontes de nutrientes, com micro-organismos inoculados.

Isto aponta para o fato bastante provável de que novos materiais, que não apenas os remineralizadores já normatizados, tendem a se integrar aos insumos agrícolas, e deverão exigir legislação específica, como as polpas/pastas de mineração e mesmo outros minerais e rochas que não cumprem os requisitos das IN MAPA 05 e 06/2016 ou da lei dos fertilizantes.

Em suma, a técnica de remineralização de solos já conta com amplo referencial teórico e prático para sua aplicação no país, que de resto por sua condição territorial conta com vastas áreas agrícolas sob regime de clima tropical, o que favorece o intemperismo dos pós de rocha. No momento, pode-se considerar que a meta principal venha a ser a prospecção e caracterização de materiais próprios para uso na agricultura, bem como a ampla divulgação dos resultados, de maneira a fomentar o lançamento de novos produtos.

Presentemente, duas rochas dacíticas e duas rochas basálticas do Grupo Serra Geral estão em processo de certificação como remineralizadores de solos por empreendimentos do RS, além do trâmite de registro de um carbonatito enquanto fosfato reativo natural.

## 4. PRINCIPAIS LITOTIPOS E MINERAIS DO GRUPO SERRA GERAL COM POTENCIAL PARA REMINERALIZAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE SOLOS

### 4.1. O GRUPO SERRA GERAL NA BACIA DO PARANÁ

O Grupo Serra Geral integra a Província Magmática Paraná-Etendeka, de idade eocretácica, constituída por basaltos continentais, que no Brasil ocupa um território de 917.000 km<sup>2</sup> e perfaz um volume aproximado de 600.000 km<sup>3</sup> de lavas (FRANK *et al.*, 2009). Países da América do Sul, como Argentina, Uruguai e Paraguai, e também a região de Etendeka, noroeste da Namíbia, no continente africano, comportam a extensão remanescente da província, relacionada à ruptura do Paleocontinente Gondwana. As rochas toleíticas vulcânicas e subvulcânicas do Grupo Serra Geral compreendem basaltos, andesitos basálticos e andesitos, com rochas ácidas e alcalinas subordinadas (dacitos, traquitos, riocacitos e riolitos). A geocronologia pelo método U-Pb em zircões indica idades no intervalo entre 135 à 131 Ma (PINTO, 2011), sugerindo um curto período de tempo para a colocação da pilha vulcânica, cuja espessura máxima atinge 1.700 m no depocentro da Bacia do Paraná.

Nas últimas décadas, as principais divisões litoestratigráficas do Grupo Serra Geral na Bacia do Paraná foram baseadas na distribuição regional dos tipos de magma, definidos por afinidades químicas (BELLIENI *et al.*, 1986, 1988). Especialmente, Peate *et al.* (1992) e Peate (1997) separaram os vulcanitos em rochas de alto Ti (> 2% TiO<sub>2</sub>) ou baixo Ti (<2% TiO<sub>2</sub>). Este tipo de abordagem se deve ao estudo de processos petrogenéticos e à determinação de fontes magmáticas e permitiu a compartimentação do Magmatismo Serra Geral em grandes grupos. No entanto, esta compartimentação não permite mais que correlações amplas ao longo da bacia.

De maneira geral, na Bacia do Paraná predominam os termos básicos, distribuídos amplamente pela Região Sul (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná), e em áreas reduzidas das Regiões Sudeste (São Paulo e Minas Gerais) e Centro-Oeste (Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul). Os termos ácidos perfazem 2,5% do volume do Grupo Serra Geral e 5% do seu território de exposição (NARDY *et al.*, 2008). Estão distribuídas principalmente nos planaltos do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina e do Paraná. De maneira ainda mais restrita, têm ocorrência no estado de São Paulo.

Para fins do presente trabalho, os conceitos convencionais de litoquímica e litoestratigrafia serão abordados na medida em que possibilitem definir domínios de rochas-fontes de determinados nutrientes para as plantas.

Dados litoquímicos representativos do Grupo Serra Geral, em toda a Bacia do Paraná, somando 773 amostras (NAKAMURA *et al.*, 2003; JANASI *et al.*, 2007; NARDY *et al.*, 2008; HARTMANN *et al.*, 2010; PINTO, HARTMANN, 2011; BERGMANN, PROVENZANO, 2017) foram apresentados no trabalho de Bergmann *et al.* (2014a), com foco no potencial para emprego em remineralização de solos.

As rochas básicas e intermediárias (basaltos, andesitos basálticos e andesitos) do Grupo Serra Geral, e que corresponderam a 704 amostras do banco de dados, apresentam teores de sílica médios entre 50 e 53%. Os percentuais de MgO estão entre 1,85 e 10,56% e de CaO entre 4,43 e 12,82%, de maneira que as rochas podem ser consideradas fontes desses nutrientes, enquanto os teores de K<sub>2</sub>O são inferiores a 3,61%. A razão CaO/MgO, que deve ficar necessariamente entre 3/1 e 4/1 em solos equilibrados, mostra-se condizente. Também o elemento benéfico Si, que está contido em plagioclásios cálcicos (labradorita e andesina) e piroxênios, minerais suscetíveis ao intemperismo, pode ser considerado disponível nas rochas basálticas do Grupo Serra Geral, que pela afiliação toleítica das rochas não contam com mais de 5% de quartzo.

Os termos ácidos (dacitos e riolitos) têm teores médios de sílica entre 65 e 72% e quantidades geralmente menores de Mg, Ca e P, ao passo que seu conteúdo de K pode ser até nove vezes superior ao dos basaltos.

#### 4.1.1. Distribuição dos litotipos do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul

Trabalhos recentes, como os de Rosseti *et al.* (2014; 2018), abordam a morfologia e arquitetura de lavas para estabelecer a história do vulcanismo através de um novo enfoque estratigráfico, e se referem à estrutura conhecida como Calha de Torres (ROSSETTI *et al.*, 2014).

Esses trabalhos foram adotados como referência na apresentação dos resultados obtidos pelo presente projeto para a litoestratigrafia das rochas da região do litoral e porção central do estado. (Figura 4.1)

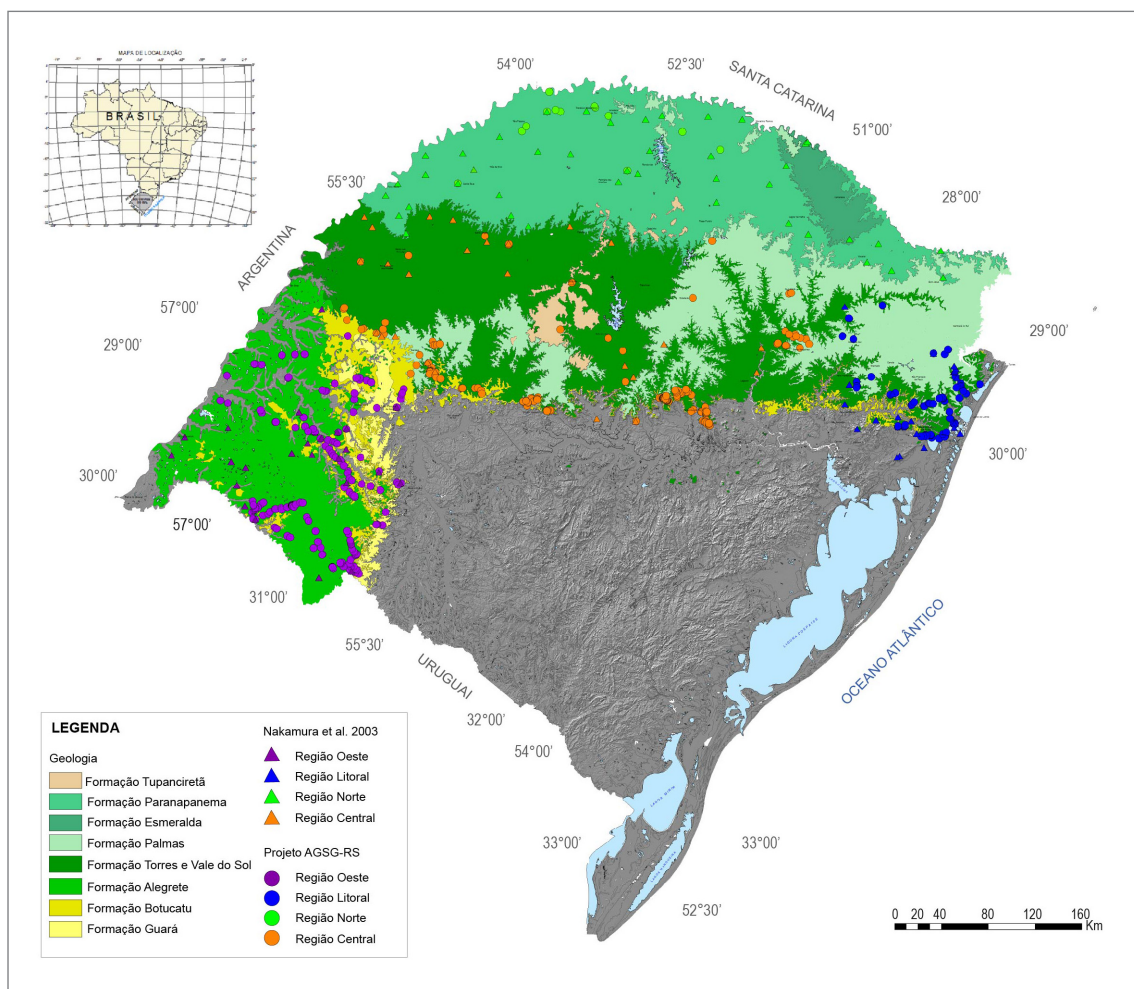
Rosseti *et al.* (2018) estabelecem a litoestratigrafia da parte sul da sequência de baixo TiO<sub>2</sub> do Grupo Serra Geral, agrupando a pilha vulcânica em quatro formações.

Segundo esses autores, a primeira, Formação Torres, repousa sobre arenitos eólicos da Formação Botucatu, que representa sedimentos de um grande deserto, um erg continental, prévio à implantação da província vulcânica. Essa primeira unidade é identificada como lobos *pahoehoe* em pilhas de derrames compostos, de afiliação litoquímica basáltica e andesito-basáltica, sendo as menos diferenciadas dentre as demais unidades (> 5% em peso MgO). A segunda unidade, a Formação Vale do Sol, é caracterizada por andesitos basálticos, em derrames de morfologia *rubbly pahoehoe*, recobertos por vulcânicas ácidas (dacitos e riólitos) da Formação Palmas, colocadas como cúpulas de lava e extensos derrames. A unidade de topo, Formação Esmeralda, é composta por fluxos *pahoehoe* de composição basáltica. Camadas sedimentares delgadas encontram-se intercaladas entre derrames e como limites de unidades. Nos domínios onde ainda não existem trabalhos que consideram a morfologia e

arquitetura das lavas, serão utilizadas outras referências. A referência adotada para a parte do Grupo Serra Geral da fronteira oeste do RS é a unidade litoestratigráfica Formação Alegrete, assim como é adotada a Formação Parapanema para o extremo norte (WILDNER; HARTMANN; LOPES, 2007).

Cabe observar que a designação Formação Alegrete é empregada no sentido dos litotipos mapeados por Bergmann *et al.* (2020), que constatou o predomínio de rochas basálticas toleíticas de composição andesito-basáltica e, subordinadamente, andesitos e basaltos.

O diagrama TAS (Figura 4.2) situa o conjunto de dados litoquímicos aqui abordado, sendo o mesmo dividido em dois conjuntos. O primeiro consiste nas análises litoquímicas de 86 amostras realizadas pelo projeto, e o segundo foi extraído do banco de dados do trabalho Nakamura *et al.* (2003), para o Rio Grande do Sul, totalizando 246 análises. Com relação à distribuição dos litotipos, a região central concentra boa parte das rochas ácidas, que correspondem à Formação Palmas, enquanto a maioria das rochas andesíticas está restrita às regiões



**Figura 4.1** - Esquema litoestratigráfico do grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul e distribuição dos pontos amostrados.

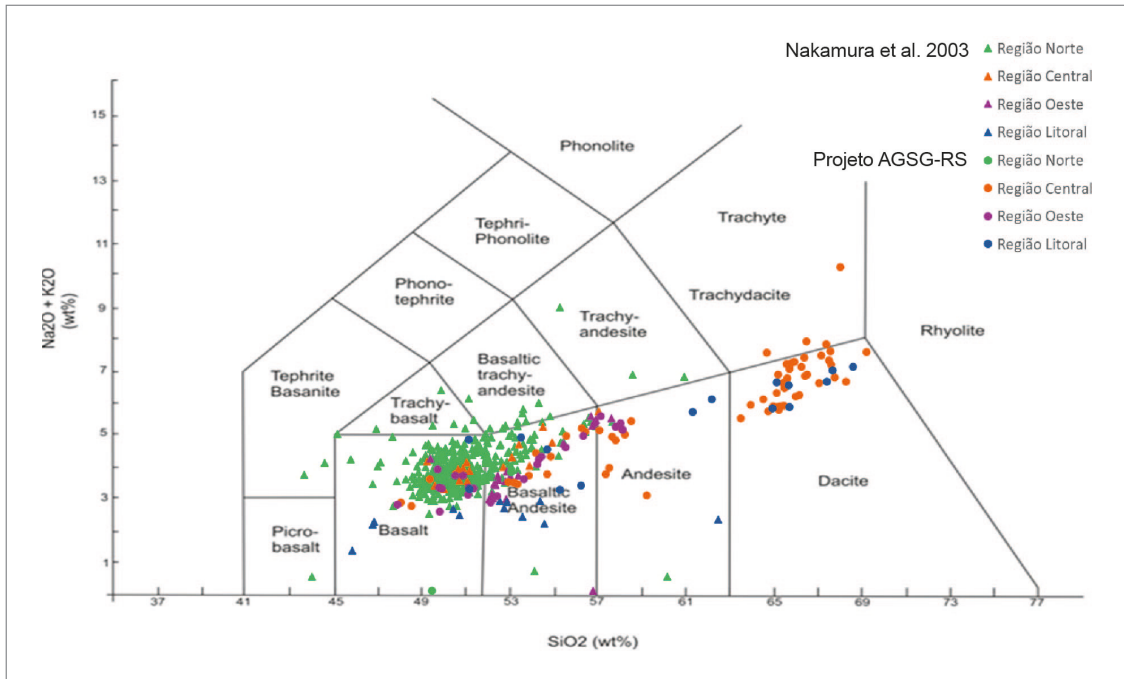


Figura 4.2 - Diagrama TAS (LE BAS *et al.*, 1986) para o conjunto de amostras dos derrames da área de estudo.

central e oeste, respectivamente nas formações Vale do Sol e Alegrete e em corpos intrusivos na proximidade de Santa Cruz do Sul, na região central. Os andesitos basálticos estão distribuídos pelas regiões norte, oeste e litoral e os basaltos se concentram na parte norte, na Formação Parapanema.

## 4.2. COMPARTIMENTAÇÃO DAS ROCHAS PESQUISADAS POR REGIÃO

A Tabela 4.1 mostra o conjunto de rochas que tiveram dados litoquímicos tratados, discriminadas conforme sua classificação por litotipo, apresentando o número de amostras em cada bloco, bem como teores e média de nutrientes.

### 4.2.1. Bloco Litoral

#### 4.2.1.1. Geologia do Bloco Litoral e lavras visitadas

A geologia deste compartimento compreende as formações Torres e Vale do Sol, que são sobrepostas por derrames ácidos da Formação Palmas ao longo da cuesta que limita os terrenos litorâneos dos Campos de Cima da Serra e da Encosta Superior do Nordeste do Rio Grande do Sul (Figura 4.3).

A Formação Torres é observada no Bloco Litoral acima de paleodunas da Formação Botucatu, que aflora de maneira restrita no bloco, entre o nível do mar e a cota 100 m, o que pode refletir a paleotopografia das

dunas ou estruturas tectônicas do tipo falhas normais, que delimitam blocos altos e baixos.

As principais exposições do contato entre os derrames do tipo lobos de basaltos amigdaloides e os arenitos podem ser encontradas em poucos cortes da BR-290 (Freeway) entre o pedágio de Santo Antônio da Patrulha e o bairro Agasa (Figura 4.4A).

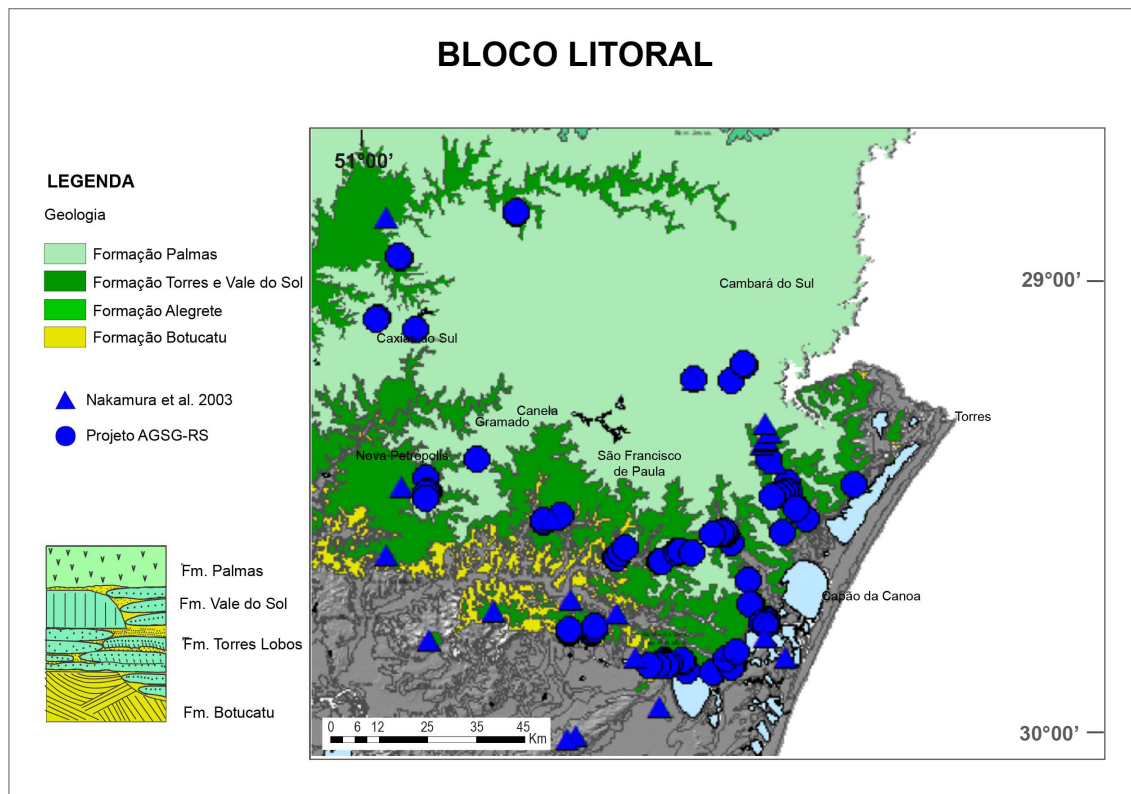
As litologias da Formação Torres são retomadas com maior detalhe no Capítulo 5, pois na unidade ocorrem basaltos amigdaloides que podem se constituir em fontes de agrominerais do grupo das zeólitas. Embora os basaltos amigdaloides possam ser fontes de nutrientes a sua caracterização litoquímica não foi detalhada, pois a composição química destas rochas é bastante variável em função do preenchimento das cavidades por diferentes minerais. Assim, os teores de sílica e óxidos de Ca, Mg, K ou Na podem refletir a composição das zeólitas que preenchem as amígdalas, minerais com potencial para condicionamento de solos, mas que não atuam como fontes de cátions para a agricultura, ver Capítulo 5.

Neste bloco, o foco da pesquisa para remineralizadores de solos recaiu sobre as formações Vale do Sol e Palmas, fontes de Ca e Mg e de K e Ca, respectivamente. No entanto, é importante salientar que é restrita a disponibilidade de finos de britagem para esta finalidade, já que a região tem poucos empreendimentos que exploram rochas destas duas formações. Ao longo do bloco a espessura aflorante do pacote de lobos é variável, ficando em torno de 50 m na região da Pedreira Britel, em Osório, e alcançando aproximados 150 m na região de Barra do Ouro, distrito do município de Maquiné.

**Tabela 4.1 -** Rochas tratadas nos blocos Litoral, Central, Fronteira Oeste e Região Norte, com litotipos discriminados, faixas de teores e médias das principais bases nutritientes.

BLOCOS GSG		TIPO DE ROCHA										LITOQUÍMICA (FAIXA D TEORES) - MÉDIA DE TODOS OS TIPOS DE ROCHAS DENTRO DO BLOCO								
		Nº TOTAL AMOSTRAS	BAS <sup>1</sup>	DAC <sup>2</sup>	AND <sup>3</sup>	AND BAS <sup>4</sup>	RIOL.	BAS. TRAQ <sup>6</sup>	CaO			MgO			K <sub>2</sub> O			SOMA DE BASE		
									L1	LS	MÉDIA	LI	LS	MÉDIA	L1	LS	MÉDIA	L1	LS	MÉDIA
Litoral	23	7	3	3	10			2,66	10,80	6,73	1,05	18,92	9,99	0,30	3,82	2,06	7,79	29,23	18,51	
Central	84	15	42	9	16	2		0,63	10,5	5,58	0,32	7,24	3,78	0,66	9,09	4,88	2,78	18,69	10,70	
Fronteira Oeste	30	10		3	17			4,78	10,53	7,66	2,20	7,04	4,62	0,47	2,87	1,67	9,83	18,00	13,92	
Região Norte	207	140		2	58		7	4,54	12,82	8,68	1,91	10,12	6,02	0,20	3,21	1,71	10,02	24,89	17,46	
<b>Total</b>	<b>344</b>	<b>172</b>	<b>45</b>	<b>17</b>	<b>101</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>3,2</b>	<b>11,2</b>	<b>7,16</b>	<b>1,4</b>	<b>10,8</b>	<b>6,10</b>	<b>0,4</b>	<b>4,7</b>	<b>2,58</b>	<b>7,6</b>	<b>22,7</b>	<b>15,15</b>	
<b>Média</b>																				

<sup>1</sup>Basalto; <sup>2</sup>Dacito; <sup>3</sup>Andesito; <sup>4</sup>Andesito basalto; <sup>5</sup>Riolito; <sup>6</sup>Basalto traquítico; <sup>7</sup>Limite inferior; <sup>8</sup>Limite superior



**Figura 4.3** - Mapa e coluna estratigráfica esquemática do Bloco Litoral, mostrando a distribuição das amostras coletadas (círculos) e compiladas (triângulos) pelo projeto. Geologia baseada em Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul 1:750.000 SBG-CPRM.

No município de Santo Antônio da Patrulha, foram visitadas várias lavras situadas a norte da RS 030, entre os bairros Esquina dos Morros e Ilha, como a Saibreira Lino, Terraplanagem Lagoa, Mineradora Santo Antônio e Saibreira da Divisa. As lavras mostram predominância de lobos do tipo “S” na Formação Torres, com rochas amigdaloides, enquanto os lobos do tipo “P”, constituídos por rochas sem amígdalas, são subordinados em número e em espessura. Os materiais explorados pelas saibreiras se destinam ao uso como cascalho em neossolos quartzarênicos da faixa de litoral, pois seu emprego como agregados para a construção civil é restrito, devido à presença de argilominerais e zeólitas.

Na Saibreira Lino (MB-230), a exemplo das outras lavras citadas, está exposto um pacote de lobos métricos da Formação Torres. Nos lobos “S”, com espessura até quatro metros, os percentuais de zeólitas podem atingir 30% (Figura 4.4B). Na maioria, os lobos não-vesiculados têm espessura sub-métrica (Figura 4.4C) e são constituídos por rochas porfíricas com fenocristais euédricos de piroxênio de até 8 mm, em matriz afanítica.

Dentre as rochas de lobos não vesiculados da Formação Torres no Bloco Litoral, foram analisadas amostras das lavras Terraplanagem Lagoa (MB-260A) e Saibreira Santo Antônio Ltda (MB-262A), andesitos basálticos, além da lava desativada da prefeitura de Maquiné em Barra do Ouro (MB-258A), de composição basáltica. No limite dos

municípios de Santo Antônio da Patrulha e Osório e em Maquiné, na região de Morro Alto, no bairro José Inácio (altura do acesso a Capão da Canoa a partir da BR 101), são observadas rochas de composição andesito-basáltica a andesítica, que conformam prováveis domos intrusivos nos lobos da Formação Torres (Figura 4.4D, 4.5A).

Na Saibreira da Divisa, ponto MB-236, a frente de lava expõe uma estrutura dômica com rochas caracterizadas por juntas colunares encurvadas na região de contato com os basaltos amigdaloides encaixantes (Figura 4.4D). As rochas têm cor cinza-escuro com tom verde e são porfíricas, com fenocristais de piroxênio euédricos e de bordos nítidos de 0,5 a 1 cm, em matriz afanítica com indícios de argilização, com celadonita abundante. A partir da litoquímica, sua composição é inconclusiva, devido à perda ao fogo de 3,3%. Provavelmente são rochas de composição andesito-basáltica a andesítica, que podem estar relacionadas a corpos dômicos de rochas da Formação Vale do Sol, intrusivos nos lobos de basaltos amigdaloides da Formação Torres, que se constituem em parte das rochas lavradas pela pedreira (Figura 4.5A).

Essas feições são recorrentes a NE, no município de Maquiné, onde, no distrito de Morro Redondo, frentes de lavras como as da Pedreira José Inácio (pontos MB-243 e MB-248), situadas nas proximidades da estação ferroviária, apresentam andesitos basálticos que

ocorrem em formas dômicas semelhantes. Nas duas lavras da Pedreira José Inácio são explorados os basaltos amigdaloides, que predominam nos lobos da Formação Torres, e as rochas porfíricas a glomeroporfíricas de cor cinza-escuro com tom verde escuro e crosta amarela dos domos. Estas últimas apresentam fenocristais e agregados de plagioclásio e piroxênio e mostram limites com as encaixantes (lobos amigdaloides) caracterizados por extensa brechação (Figura 4.5B). Estas brechas estão constituídas por clastos de rocha basáltica microcristalina maciça ou basaltos amigdaloides semelhantes aos da Formação Torres, cimentados por encrustações de zeólitas, com predomínio da laumontita (ver Cap. 5, figura 5.2B). Em zona contígua à área brechada (Figura 4.5C), estão expostas rochas com juntas colunares retas a encurvadas em direção à parte superior do afloramento, onde predomina disjunção planar sub-horizontal. O derrame espesso exposto na Pedreira Ribas Construtora, acima do conjunto de lobos da Formação Torres, é

creditado neste trabalho à Formação Vale do Sol, embora por falta de exposições de sua zona de topo não fique confirmada a morfologia *rubbly-pahoehoe*. Alternativamente, a extrema regularidade da disjunção observada nas colunas na frente de lava pode indicar um corpo do tipo *sill*, colocado no intervalo estratigráfico entre as duas unidades (Figura 4.5D). A rocha observada na lava é afanítica e tem coloração cinza-escuro, com tom verde escuro, e crosta amarelo-ocre. Sua composição é andesito-basáltica.

A Pedreira Ribas (MB-250A) tem acesso pela BR 101, na altura do km 93, a N da zona urbana de Osório, e produz agregados do tipo brita “zero”, “1” e “2”, obtendo finos de britagem a partir do reprocessamento de brita “1”, com emprego de britador VSI.

No bairro Laranjeiras, no município de Osório (ponto MB-231), uma pedreira desativada do Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER) expõe um dique, com rochas de composição



**Figura 4.4** - (A) Corte de estrada mostrando lobos de basaltos amigdaloides acima de duna da Formação Botucatu. (B) Detalhe de lobo do tipo “S” e (C) Alternância de lobos com basaltos amigdaloides (rochas mais intemperizadas com cor amarelada) e lobos “P”, que são mais delgados, exceto pelo lobo da base da foto. Frente de lava da Pedreira Lino, talude de 15 m. (D). Possível contato intrusivo entre andesito basáltico com juntas colunares retas a curvas e conjunto de lobos amigdaloides da Formação Torres, acima. Saibreira da Divisa, Santo Antônio da Patrulha.





**Figura 4.5** - (A) Litotipos lavrados pela Saibreira da Divisa, os blocos escuros ao fundo correspondem às rochas porfíricas intrusivas em lobos amigdaloides da Formação Torres (em primeiro plano). (B) Zona intensamente brechada na frente oeste da “lavra 2” da Pedreira José Inácio, notar bloco de brecha com clastos de basalto amigdalóide cimentada por zeólitas (crosta branca), ao centro da foto. (C) Frente norte da “lavra 2” da Pedreira José Inácio. Notar juntas colunares regulares nesta parte da lavra, contígua à zona brechada (B). (D) Bancadas da Pedreira Ribas Construtora, notar feições de disjunção decimétrica com juntas colunares retas a curvas (à direita na foto) muito regulares.

dacítica, encaixado nos lobos da Formação Torres ao longo de zona de falha do sistema NW. Provavelmente se trata de um dos dutos alimentadores dos derrames ácidos da Formação Palmas. Embora a exposição esteja encoberta pela revegetação e por entulho de materiais da própria lavra, se pode observar o contato de rochas ácidas porfíricas com matriz vítrea, que apresentam foliação de fluxo vertical, cortando os lobos da Formação Torres em bancos horizontais (Figura 4.6A). Apesar de desativada a pedreira se constitui, pelo seu passivo ambiental não mitigado, em uma fonte de rochas vítreas ricas em potássio.

No município de Osório, foi visitada a Pedreira Britel (ponto MB-251), que tem acesso pelo trecho antigo da BR 101 (acesso a Morro Alto), na altura do km 77. Essa lavra é uma das mais ativas do município e produz brita nas diferentes granulometrias, além de rachão, pedras para calçamento e agregado fino destinado à indústria

de cimento. A lavra se encontra atualmente em fase de implantação de moinho VSI.

O empreendimento explora rochas do intervalo estratigráfico local entre o topo da Formação Torres e o primeiro derrame local da Formação Vale do Sol (Figura 4.6B).

Na bancada inferior, por volta da cota 52 m, se encontra exposto um conjunto de derrames da Formação Torres, de espessura individual máxima inferior a três metros, com predomínio de lobos do tipo “S”. O percentual de amígdalas varia entre 10 e 20%, majoritariamente preenchidas por zeólitas (Figura 4.6C). Os lobos “P” apresentam basalto de cor grafite com textura porfírica, com fenocristais de plagioclásio de 1 a 2 mm em matriz afanítica a fanerítica fina.

A bancada superior é composta por dois lances, com taludes de aproximados 12 m, e expõe um derrame com disjunção colunar decimétrica a submétrica (Figura 4.6D),



**Figura 4.6** - (A) Contato vertical de rochas ácidas porfíricas, na parte superior esquerda da foto, com lobos amigdaloides da Formação Torres, ao longo de parede de dique. Notar foliação de fluxo vertical nas rochas do dique e horizontal nos lobos. Pedreira do DAER, Bairro Laranjeiras, Osório. (B) Lobos da Formação Torres na bancada inferior, superpostos por derrame andesítico espesso da Formação Vale do Sol. Pedreira Britel, Osório. (C) Pedreira Britel, detalhe da bancada inferior, contato de lobos “P” inferior e “S”, com basalto amigdalóide, e (D) base da bancada superior, com juntas colunares decimétricas a submétricas em rocha andesítica.

que sobrepõe, em contato ligeiramente ondulado, o conjunto da bancada inferior, na altura da cota 71 m. A rocha, de composição andesítica, tem cor cinza-médio e aspecto bandado, alternando níveis de 2-3 cm marcados por oxidação (Figura 4.7A). Sua textura é porfírica, com fenocristais subédricos de plagioclásio e piroxênio em matriz afanítica. O topo do derrame não foi observado e sua morfologia permanece indeterminada. No entanto, o aspecto e composição da rocha, semelhantes aos litotipos da Formação Vale do Sol observados no Bloco Central, indicam se tratar desta última unidade litoestratigráfica.

A composição da rocha, que se aproxima de um dacito pelos teores de sílica e de  $K_2O$  (ver item 4.2.1.1), e o fato de que a lavra se encontra operando rochas de quimismo distinto, introduz a possibilidade de obtenção de um agromineral fonte de K e também de Ca e Mg, através da mistura dos finos de britagem. Adicionalmente, a presença de zeólitas agregaria um material condicionador de solos à mistura. Ainda no Bloco Litoral, ao longo da BR-453, Rota do Sol, na região próxima ao acesso a

Cambará do Sul (ponto MB-002), foram pesquisadas rochas vítreas ácidas (vitrófiros) da Formação Palmas, que afloram em um intervalo de cotas com espessura mínima de 60 m e estão referidos no Mapa Geológico do Rio Grande do Sul 1:750.000 (CPRM 2008), como Fácies Várzea do Cedro da Formação Palmas.

São rochas vítreas de cor grafite, com aspecto de pitchstones, apresentando juntas colunares submétricas de faces retas e grande regularidade (Figura 4.7B), bem como com amígdalas esparsas de até 2-3 cm, fortemente deformadas por fluxo e preenchidas por calcedônia (Figura 4.7C).

A amostra encaminhada para litoquímica indicou composição dacítica para os vitrófiros, com teor de  $K_2O$  de 3,42%. No entanto, a Soma de Bases (SB), como a dos demais dacitos pesquisados, é inferior a 9%, não cumprindo à exigência da IN MAPA 05/2016. Seu emprego como remineralizador de solos fica condicionado a mistura com outros litotipos para contemplar a legislação vigente.

Em condições de clima temperado, rochas vítreas ácidas podem dar origem a perfis de alteração ricos em montmorilonitas, eventualmente formando depósitos de argilas bentoníticas, o que constitui um indicativo para investigação do seu potencial. Em afloramentos na estrada de acesso a Cambará do Sul, próximo à Vila União (ponto MB-003), foram observados perfis de intemperismo de até 3 m nos vitrófiros, com argila plástica de cor verde-maçã, caracterizada por difratometria como montmorilonita (Figura 4.7D).

Como os plagioclásios das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral são ordinariamente cálcicos, a ocorrência de bentonitas sódicas é pouco provável, mas não deve ser excluída, sendo recomendado centrar os trabalhos em zonas topograficamente favoráveis ao desenvolvimento de perfis de alteração espessos, como topos planos e mal drenados.

Os perfis de alteração com espessura maior são característicos de blocos altos de falha, que tendem a gerar terrenos mais dissecados. Por fim, na Pedreira

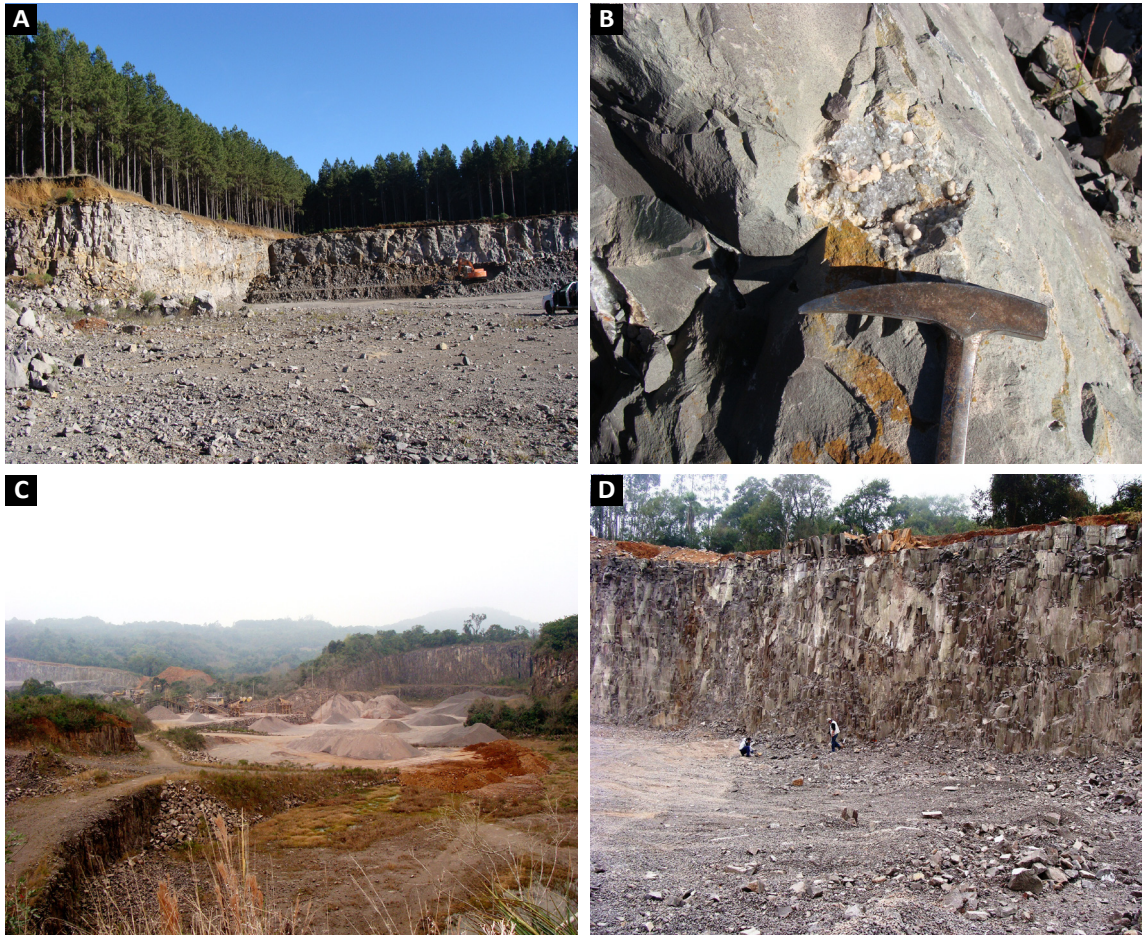
Sultepa da localidade de Tainhas, município de São Francisco de Paula, foram levantados os dacitos da Formação Palmas no Bloco Litoral. A pedreira tem acesso pela RS 453, a oeste do Viaduto da Cascata.

Esta lavra (Figura 4.8A) conta com um único talude, de aproximados 15 m de altura, e explora a porção entre a zona central e o topo de derrame dacítico, apresentando juntas colunares de grande regularidade. A parte superior da zona central do derrame conta com geodos centimétricos a decimétricos, preenchidos por uma grande variedade de zeólitas (FRANK, 2008), quartzo e calcita.

A rocha explorada é um dacito microporfirítico de cor cinza-claro com tom verde-claro, com teor de  $\text{SiO}_2$  de 67,58%, e  $\text{K}_2\text{O}$  3,82%. A soma de bases atinge 7,79%, teor inferior ao estabelecido como mínimo para os remineralizadores de solos. A presença de geodos com preenchimento que inclui quartzo (Figura 4.8B), introduz a necessidade de controle em um eventual aproveitamento da rocha em misturas de agrominerais.



**Figura 4.7** - (A) Rocha andesítica da bancada superior da Pedreira Britel, Osório. Notar alternância de bandas com grau de oxidação distinto, segundo a foliação de fluxo. (B) Vitrófiros da Formação Palmas com juntas colunares submétricas, Rodovia BR 453. (C) Aspecto da rocha vitrofírica, com amígdalas oblatas preenchidas por calcedônia. (D) Perfil intemperístico de espessura métrica no vitrófiro, com argila plástica de cor verde-maçã (montmorilonita).



**Figura 4.8** - (A) Praça de lavra em dacitos do Bloco Litoral. Pedreira Sultepa, em Tainhas, São Francisco do Sul. (B) Detalhe de cavidade revestida por quartzo com cristais de zeólita rosada acima, na mesma lavra. (C) Mineração Andreas, da Treviplam Engenharia Ltda, em um corpo geológico do tipo *sill*. Município de Vera Cruz. (D) Juntas colunares de grande regularidade na parede N da lavra.

#### 4.2.1.2. Tratamento dos dados litoquímico das rochas do Bloco Litoral

O Bloco litoral conta com resultados litoquímicos para 23 amostras, entre as quais sete basaltos, dez andesitos basálticos, três andesitos e três dacitos. Quanto aos critérios da IN MAPA 05/2016 (BRASIL, 2016), as amostras têm soma de bases (SB) entre 16,28 e 8,1%, sendo que 87% das rochas cumprem o critério de  $SB \geq 9\%$  e 78% das amostras analisadas apresentam  $K_2O \geq 1\%$  previstos na norma.

Os teores de elementos potencialmente tóxicos (EPT) atendem aos limites de As, Cd e Pb, com a ressalva de que uma parte das amostras não conta com análise para Hg, um elemento com distribuição pouco usual em rochas vulcânicas de afiliação basáltica ou dacítica.

#### 4.2.2. Bloco Central

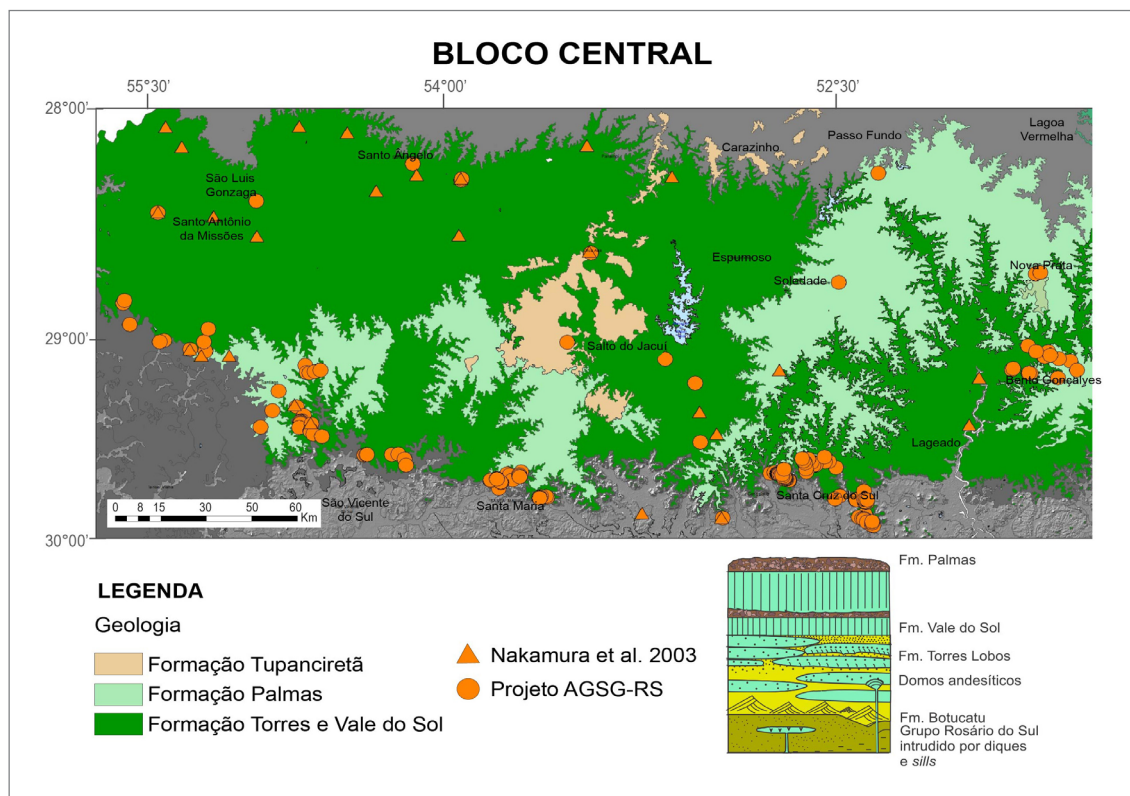
Este domínio compreende à faixa de terrenos do Grupo Serra Geral entre a Depressão Central do Rio

Grande do Sul e a região do Alto Uruguai (Figuras 4.1 e 4.9). Dentre as rochas com potencial para remineralização e condicionamento de solos, foram visitados afloramentos e pedreiras ativas e inativas na região de Santa Cruz do Sul, Santa Maria, Salto do Jacuí, Soledade, Cruz Alta, Caxias, Vale dos Vinhedos, Nova Prata e Santiago. A oeste e a noroeste do bloco, foram levantadas lavras e afloramentos em Manoel Viana, São Francisco de Assis, Santo Ângelo das Missões e São Luiz Gonzaga.

##### 4.2.2.1. Geologia do Bloco Central e lavras visitadas

A parte sul do Bloco Central corresponde à base da pilha vulcânica do Grupo Serra Geral e os perfis, entre a BR 386 e a parte norte do bloco, mostram sedimentos triássicos do Grupo Rosário do Sul, passando, no topo, aos arenitos da Formação Botucatu, que são superpostos pelos lobos de basaltos amigdaloides da Formação Torres.

Na parte média da porção sul do bloco, nas regiões de Santa Cruz do Sul, Vale do Sol e Candelária, os arenitos



**Figura 4.9** - Mapa Geológico simplificado e coluna estratigráfica esquemática do Bloco Central, mostrando a distribuição das amostras coletadas (círculos) e compiladas (triângulos) pelo projeto. Geologia baseada em Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul 1:750.000, CPRM.

Botucatu estão restritos a poucas formas de camadas do tipo dunas eólicas e lençóis de areia sobrepostos aos sedimentos Rosário do Sul, voltando a conformar intervalos estratigráficos mais espessos na região de Santa Maria.

O pacote da Formação Torres, que alterna lobos P e S, atinge 240 m no perfil Vila Formosa-Herveiras, ao longo da RSC-471, entre os pontos MB-062 e MB-065, e mostra espessura da mesma ordem em perfil por estrada vicinal entre Sinimbu e a RSC-471. Essas litologias são abordadas com maior detalhe no Capítulo 5 do Informe Mineral, enquanto prospectos para zeólitas. Camadas centimétricas a decimétricas de quartzo arenitos intertrápicos, semelhantes às rochas da Formação Botucatu, intercalam os lobos de espessura submétrica a métrica, cujo conjunto é superposto por derrames espessos de morfologia *rubbly-pahoehoe* da Formação Vale do Sol, por sua vez capeados pelos derrames ácidos da Formação Palmas. Esse arranjo, semelhante ao do Bloco Litoral, se repete ao longo do Bloco Central, sendo constatado em perfis na Região Metropolitana de Porto Alegre (Taquara e Morro Reuter), e nas regiões do Vale do Taquari e Vale dos Vinhedos. A região de Santa Maria, mais a oeste, se constitui em exceção, com o primeiro derrame dacítico da Formação Palmas superpondo diretamente os lobos de basalto amigaloide da Formação Torres.

Na região de Santa Cruz do Sul (SCS), foram visitadas as lavras mais expressivas em termos de produção de brita basáltica. Em Vera Cruz, município de Vale do Rio Pardo vizinho a SCS, a Mineração Andréas (Figura 4.8C) constitui uma extensa praça de lavra (400 x 200 m, com talude de 15 m de altura) explorada pela empresa Treviplam Engenharia Ltda, em um *sill* de dimensões em torno de 5 km<sup>2</sup>, intrusivo em rochas sedimentares do Grupo Rosário do Sul.

Na lavra (ponto MB-038), destacam-se as feições de juntas colunares de espessura decimétrica a submétrica, com faces retas e grande regularidade (Figura 4.8D). A rocha minerada tem cor cinza-médio a escuro com tom verde-claro e textura equigranular média, apresentando eventuais porções pegmatoides de espessura e continuidade centimétrica e de contornos difusos, com cristais aciculares de piroxênio. Sua composição é andesito-basáltica, com soma de bases que atinge 16,5% e teor de K<sub>2</sub>O de 1,38%, cumprindo os requisitos para remineralizador de solos. Um segundo empreendimento de lavra encontrava-se em fase de licenciamento no âmbito do sill de Vera Cruz ao tempo da visita do projeto, apresentando rochas semelhantes às encontradas na lavra da Mineração Andréas (ponto MB-039).

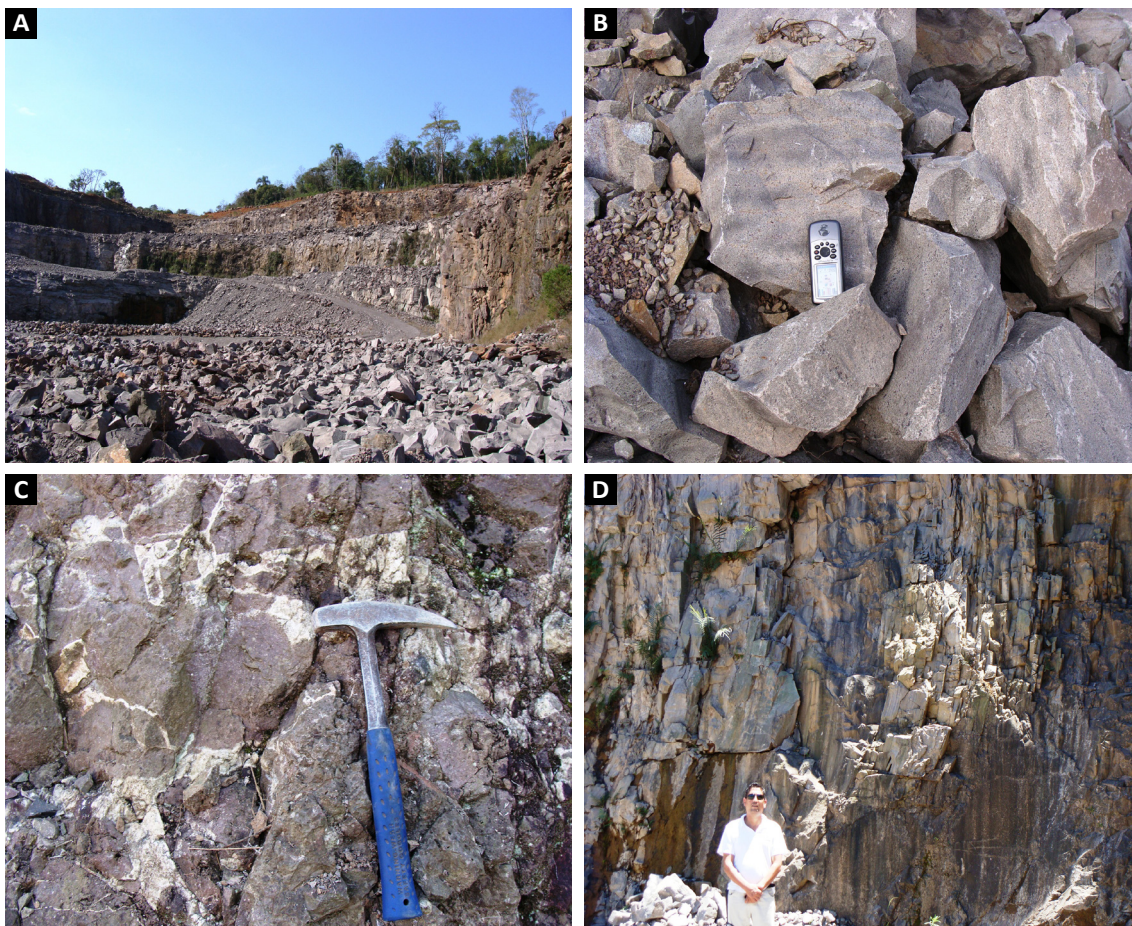
Na região a N e NE da zona urbana Santa Cruz do Sul, lavras da empresa Treviplam Engenharia Ltda expõem

corpos geológicos tabulares a dômicos de composição andesítica, brechados no contato com rochas basálticas amigdaloides ou maciças de prováveis derrames da Formação Torres.

Na Brita Ouro Preto (Figura 4.10A), que tem acesso pela BR 273 e está situada nas imediações do aeroporto de Santa Cruz do Sul (pontos MB-40 e 76 a 80), a rocha minerada apresenta cor cinza claro com tom azul, com estrutura bandada por alternância de bandas de 3-4 cm de tons de cinza ligeiramente mais escuro (Figura 4.10B). Sua textura é porfírica, com fenocristais tabulares de 1-2 mm de plagioclásio e subordinadamente de piroxênio em matriz afanítica. Brechas com clastos de basaltos amigdaloides cimentados pelas zeólitas estilbita e, secundariamente, laumontita (Figura 4.10C), são observadas no piso e em alguns setores das paredes da lavra, como abaixo do britador (parede S) e em parte da parede N. São encontrados, também, bancos de quartzito arenito semelhante ao da Formação Botucatu na extremidade W da pedreira. A foliação de fluxo da rocha, predominantemente sub-horizontal a horizontal na lavra, mostra-se

vertical em setores da parede S (Figura 4.10D), indicando prováveis canais alimentadores do tipo dique. Na periferia da lavra, recupera-se disjunção em “calota”, a exemplo da notável feição observada na Brita Pinheiral, situada alguns quilômetros a E. Na lavra desativada da Brita Pinheiral (ponto MB-83), situada no bairro de mesmo nome, a NE de Santa Cruz do Sul, as rochas exploradas são química e petrograficamente semelhantes às da Brita Ouro Preto. Essa lavra explora um corpo geológico de tendência circular em planta, com diâmetro aproximado de 500 m. A pedreira tem formato semicircular e frente de lavra de 150 m, cujo avanço aconteceu de E para W, como mostra a secção apresentada na Figura 4.11, onde se observa uma persistente disjunção em “calota”, que por sua vez espelha o bandamento da rocha, semelhante ao do litotipo da Lavra Ouro Preto (Figura 4.10B).

Furos de sonda, no piso da lavra, interceptam rochas sedimentares sílticas, entre profundidades subaflorentes até nove metros. Alteritos de rochas semelhantes estão também expostos na parede N da lavra, nos limites do corpo. As feições observadas nesse corpo geológico



**Figura 4.10** - Lavra Ouro Preto em Santa Cruz do Sul. (A) Vista da pedreira de W para E, com frente avanço de lavra ao fundo. Bancadas com altura aproximada de 8 m. (B) Rocha lavrada na Pedreira Ouro Preto, notar bandamento conferido por alternância de cores cinza-claro e cinza- médio. (C) Brecha com clastos de basalto amigdaloides na parede N da lavra. (D) Foliação de fluxo vertical em setor da parede S. A disjunção corresponde ao bandamento da rocha.



**Figura 4.11** - Frente de lavra W da Pedreira Pinheiral, no distrito de Pinheiral, a NE da zona urbana de Santa Cruz do Sul. Notar disjunção concêntrica com aspecto de “calota”. À direita na foto, solo avermelhado com alteritos de rochas sedimentares silticas do Grupo Rosário do Sul. Foto Heinrich Theodor Frank .

sugerem fortemente a ocorrência de um domo andesítico intrusivo nos sedimentos do Grupo Rosário do Sul.

Rocha andesítica, similar às descritas para as lavras Ouro Preto e Pinheiral, foi encontrada no ponto MB-41, no Bairro Fátima, no limite E da região metropolitana de Santa Cruz do Sul, com acesso pela via que leva a Passo do Sobrado. Nesse local, uma pedreira desativada mostra no talude rochas com bandamento horizontal sobrepostas a basaltos amigdaloides oxidados com crostas a zeolita expostos no piso (Figuras 4.12A e 4.12B), que pertencem provavelmente à Formação Torres. No corte da rodovia, em nível imediatamente abaixo do piso da pedreira, é possível ver que os basaltos amigdaloides permeiam o flanco de uma duna de arenitos da Formação Botucatu (Figura 4.12C), com feições de miscigenação de lavas e areia.

Relevos residuais de rochas bandadas semelhantes àquelas das lavras Ouro Preto, Pinheiral e do Bairro Fátima, são observados em várias lavras de rachão e aterro desativadas no Bairro Fátima, a exemplo dos pontos MB-052, e MB 056, este último no Corredor Frey. Nelas, a superfície limitante de aproveitamento se constitui em basaltos amigdaloides ricos em zeólitas, que afloram no piso das lavras por volta das cotas 190 a 230 m.

Ainda na estrada vicinal Corredor do Frey, na periferia SE de SCS, foram encontrados litotipos de composição andesítica, petrograficamente distintos. No local (ponto MB-055) foi encontrada, em corte raso e no piso da via, uma rocha andesítica de cor cinza-escuro com tom verde, de textura glomeroporfírica, portando fenocristais de plagioclásio e piroxênio em matriz afanítica sobrepondo quartzo-arenitos rosados do Grupo Rosário do Sul.

No perfil Vale do Sol-Herveiras, RSC 471, tornam a aflorar rochas com textura e estrutura de bandamento

semelhantes às das lavras Ouro Preto, Pinheiral e Fátima, acima dos lobos amigdaloides da Formação Torres. No ponto MB-065, o primeiro derrame local da Formação Vale do Sol, de morfologia rumbly-pahoehoe, exibe bandamento de fluxo sub-horizontal, apresentando feições do tipo disjunção em “calota” (Figura 4.12D). No entanto, o derrame tem composição andesito-basáltica.

As rochas andesíticas da região de SCS apresentam  $\text{SiO}_2$  entre 57,55 e 58,39%, soma de bases entre 11,70 e 12,73% e teores de  $\text{K}_2\text{O}$  entre 1,43 e 2,80%, o que as qualifica como remineralizadores de solos.

No município de Montenegro, foi pesquisada a lavra Britagem Montenegro, da Construtora Irmãos Carollo (MB-421), situada na estrada Antônio Inácio de Oliveira Filho, nº 269 e a saibreira Grötz (MB-422).

A pedreira da Construtora Carollo (Figura 4.13A) explora um *sill* intrusivo em rochas sedimentares da Formação Pirambóia da Bacia do Paraná, com espessura de aproximados 30 m, delimitado entre a bancada superior e o piso da pedreira.

No piso da lavra, arenitos de cor avermelhada mostram feições de disjunção poligonal associada ao efeito térmico provocado pela intrusão (Figura 4.13B), com limite dos polígonos mineralizados por calcita. Destacam-se as juntas colunares de espessura centimétrica com faces retas de extrema regularidade (Figura 4.13C), feição típica de corpo do tipo *sill*.

As rochas do *sill* têm composição andesito-basáltica, com soma de bases por volta de 12%, e  $\text{K}_2\text{O}$  1,65%, atendendo aos limites da legislação dos remineralizadores de solos.

Ambos os empreendimentos suprem a demanda por um componente mineral nos seus produtos de compostagem da Cooperativa dos Citricultores Ecológicos do Vale do Caí (Ecocitrus). A empresa Ecocitrus opera



**Figura 4.12** - (A) Pedreira desativada no bairro Fátima, em Santa Cruz do Sul, com rochas bandadas semelhantes às das lavras Ouro Preto e Pinheiral. (B) Piso da mesma lavra, expondo basaltos amigdaloides oxidados. (C) Corte de rodovia em nível abaixo da lavra em (A), com basaltos amigdaloides permeando flanco de duna de arenitos da Formação Botucatu. (D) Corte da RSC-471 com rocha andesito-basáltica exibindo bandamento e disjunção “em calota”.

no recebimento e tratamento de resíduos orgânicos de toda a região de Montenegro, produzindo fertilizante orgânico composto classe B e Biogás GN verde, entre outros produtos. Em uma tentativa preliminar de uso em escala comercial, foram adicionadas, em leivas de compostagem selecionadas, 5% e 10% de basaltos amigdaloides a zeólitas no composto orgânico e foi feita a mistura em leivas distintas de 10% de finos de britagem da lavra da Construtora Carollo ao composto orgânico. Ambas as dosagens se mostraram eficazes no controle de odor do composto, porém são necessários testes formais para definir o resultado, assim como o efeito da fração de finos de britagem no composto, o que requer testes agrônômicos.

Dentro dos limites do Bloco central foram caracterizadas rochas ácidas da Formação Palmas, incluindo lavras e afloramentos na região do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (DMSJ), como o Garimpo Billig; Santiago-Jaguari (perfis na rodovia BR-287 e vicinais); Ibirama (lavra em vitrófiros); afloramentos de vitrófiros entre Estrela Velha e Arroio do Tigre; Santa Maria (Brita Pinhal,

em Itaara) Caxias do Sul (Pedreira Caxiense do Grupo Fagundes); no Vale dos Vinhedos (pedreira Concesul de Bento Gonçalves, PCH Palanquinhos); nas proximidades de Passo Fundo (Lavra Andretta); em Soledade (Britagem Soledade Ltda). Segundo Heemann (2005), o DMSJ perfaz uma área de 250 Km<sup>2</sup> imediatamente a sul da cidade de Salto do Jacuí, com as lavras garimpeiras distribuídas ao longo das margens do Rio Jacuí. A extração de ágatas ocorre por lavra manual e semi-mecanizada, a céu aberto e em galerias.

As unidades vulcânicas constituem a denominada “Estrutura Jacuí” (HEEMANN, 2005), e seu ordenamento litoestratigráfico comporta três unidades: 1) Dacito semi-vítreo vesículo-amigdaloidal inferior (DSVI), 2) Basalto vesículo-amigdaloidal mineralizado (BM ou Tabatinga, e 3) Dacito vesicular (DV), também referido como “cupim”, que sobrepõe o nível mineralizado.

O Garimpo Billig, no Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (DMSJ), nas proximidades da cidade de mesmo nome, constitui-se em lavra mecanizada, que movimenta grandes volumes de alteritos (da ordem de





**Figura 4.13** - (A) Vista do *sill* da Lavra Carollo, intrusivo em rochas sedimentares da Formação Pirambóia da Bacia do Paraná, visíveis em cor avermelha ao alto na foto. Município de Montenegro. (B) Exposição dos arenitos da Formação Pirambóia, no piso da pedreira Carollo, com feições poligonais revestidas por calcita. (C) Detalhe do basalto da Lavra Carollo, com juntas colunares subdecimétricas de faces retas extremamente regulares, martelo ao centro. (D) Basaltos amigdaloides com cavidades preenchidas por zeólitas que atingem percentual superior a 30%. Lavra Grötz, em Montenegro.

2.000 m<sup>3</sup>/ano), que encaixam geodos mineralizados a ágata. O garimpo foi visitado para investigar a perspectiva futura da presença de rochas em pilhas de descartes, uma vez que opera extraíndo as ágatas no nível de rochas intemperizadas “BM”.

A Figura 4.14, extraída do trabalho de mapeamento da Folha Sobradinho 1:100.000, executado pelo SGB-CPRM (GODOY et al., 2016) ilustra a Estrutura Jacuí no Garimpo Billig, evidenciando que as rochas dispostas nas pilhas de descartes desta e de outras minerações correspondem, em sua maior parte, ao Dacito Vesicular (DV), uma vez que as rochas encaixantes dos geodos estão muito intemperizadas e correspondem a um saibro argiloso após a extração dos geodos.

Duas amostras de rochas do DV do Garimpo Billig (Figura 4.15A) foram analisadas com resultados que confirmam a composição dacítica (SiO<sub>2</sub> entre 65,1 e 65,9%) e soma de bases entre 7,4 e 7,5%. Neste parâmetro, os teores de K<sub>2</sub>O respondem por 2,5 a 2,7%, enquanto o CaO fica próximo a 3,4%, sendo os teores de MgO inferiores a

1,5%. Os resultados evidenciam, de maneira preliminar, que as rochas dos descartes de mineração da Estrutura Jacuí requerem mistura com outras rochas para atender a IN MAPA 05/2016 para os Remineralizadores de Solos quanto à soma de bases. Isto ocorre a exemplo da maioria das rochas ácidas do Grupo Serra Geral. No caso do Garimpo Billig, a medida implica na diluição dos teores de K<sub>2</sub>O, que já não são expressivos em relação ao conjunto de rochas da Formação Palmas que foram caracterizadas pelo projeto.

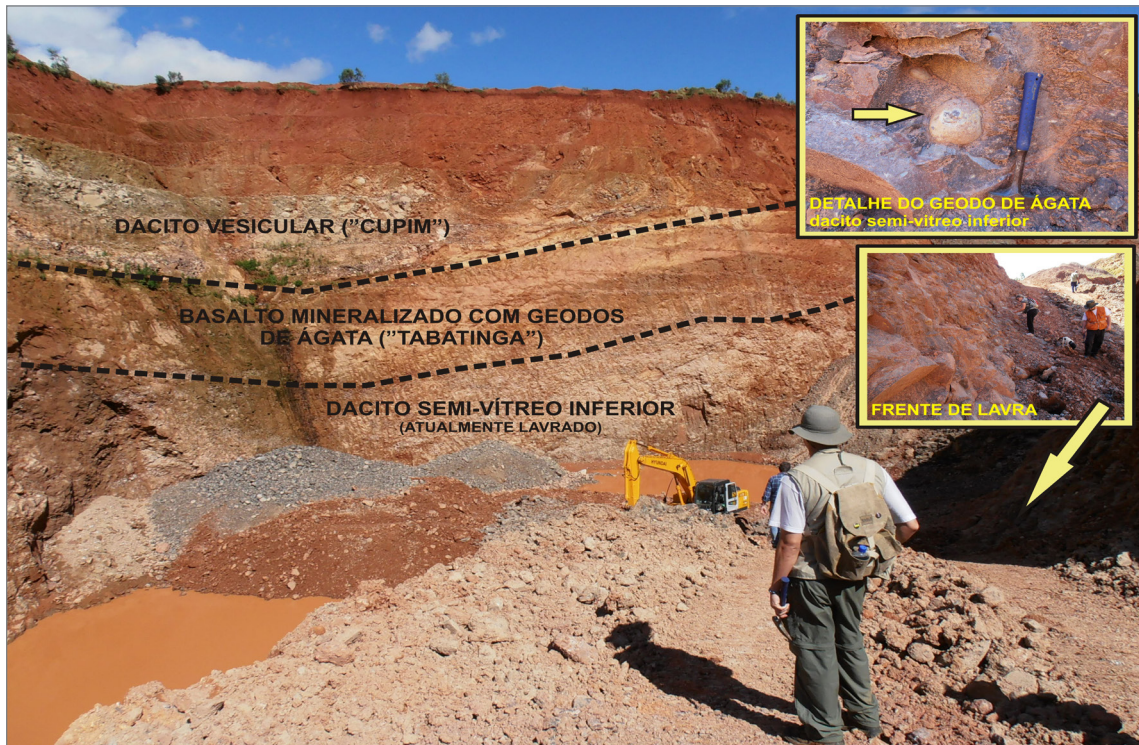
Essas rochas são importantes se considerados os volumes acumulados nas várias frentes de lavra de ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí e também, por se constituírem em litotipos semivítreos, com potencial para maior reatividade em solos.

No município de Itaara, a norte da cidade de Santa Maria, foi caracterizada a rocha dacítica explorada pela lavra de grande porte Brita Pinhal, situada na BR 158, km 313. A lavra comercializa uma ampla variedade de produtos, como brita de granulometria 0 a 3 e brita ¾

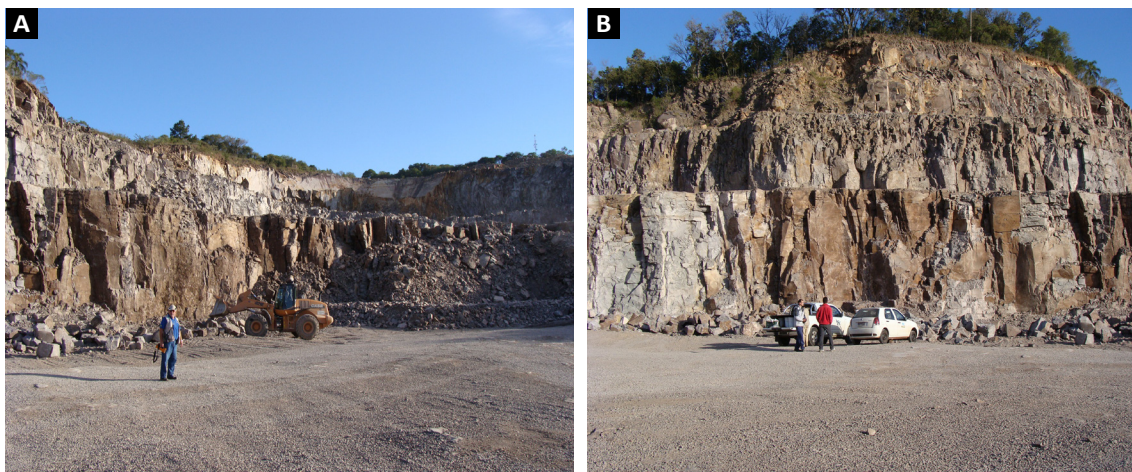
e 3/8, rachão e pedras de alicerce e finos de britagem, que são usados empiricamente na agricultura familiar dos municípios de Itaara e Santa Maria.

A Brita Pinhal (Figura 4.15 A,B) opera a extração de rochas na zona central do primeiro derrame local da Formação Palmas, na cota 412 metros, consistindo em frente de lavra oval, com eixo maior superior a 600 metros e três bancadas de 12 metros de altura. O derrame superpõe os lobos de basalto amigdalóide da Formação Torres,

capeados por bancos de arenitos intertrápicos da Formação Botucatu. Duas amostras da Brita Pinhal revelaram teores de SiO<sub>2</sub> entre 67,9 e 68,8%, K<sub>2</sub>O por volta de 4,4%, CaO entre 1,9 e 2,3% e aproximadamente 0,8% de MgO, com soma de bases entre 7,1 e 7,5, o que aponta a necessidade de mistura com outras rochas para alcançar as especificações de BRASIL (2016). Não obstante, desde que confirmada sua eficiência agrônômica, as rochas dacíticas podem constituir fertilizantes simples, fontes de potássio.



**Figura 4.14** - Imagem da Estrutura Jacuí exposta no Garimpo Billig, no Distrito Mineiro de Salto do Jacuí, nas proximidades da cidade de mesmo nome. Observar rochas parcialmente intemperizadas na camada de dacitos vesiculares que capeiam o basalto mineralizado com geodos de ágata. Extraído de Godoy *et al.* 2016



**Figura 4.15** - (A) vista geral da Brita Pinhal, em Itaara, com três bancadas de lavra em rochas dacíticas. (B) Detalhe da frente E da Brita Pinhal. Notar disjunção colunar irregular em juntas de espessura métrica a submétricas no derrame dacítico e planos de falha do sistema N-S a NE com aspecto oxidado.

Afloramentos de derrames da Formação Palmas foram visitados no Domínio Central, na região do Vale dos Vinhedos, entre Bento Gonçalves e Monte Belo, assim como em Santiago e em Passo Fundo.

#### 4.2.2.2. Tratamento dos dados litoquímico das rochas do Bloco Central

O Bloco Central conta com resultados litoquímicos para 84 amostras, entre as quais 15 basaltos, 16 andesitos basálticos, nove andesitos, 42 dacitos, e dois riolitos.

Quanto aos critérios estabelecidos em BRASIL (2016), as amostras têm soma de bases (SB) entre 2,78% (um dos riolitos) e 18,69%, sendo que 51% das rochas cumprem o critério de  $SB \geq 9\%$  e 93% apresenta  $K_2O \geq 1\%$ .

Cabe observar que as rochas com soma de bases inferior a 9% correspondem aos dacitos, que têm ampla distribuição em área no Bloco Central e ocupam quase a metade da superfície delimitada para o mesmo.

Os teores de elementos potencialmente tóxicos (EPT) atendem aos limites de As, e Pb e, para uma parte das amostras, não estão disponíveis análises para Hg. Nove das amostras de basalto deste domínio apresentam teores de Cd superiores ao permitido pela norma (entre 10,8 e 15,1 ppm), sendo o limite estipulado em 10 ppm de Cd.

#### 4.2.3. Bloco Fronteira Oeste

O Bloco Fronteira Oeste (Figura 4.16) corresponde à Formação Alegrete, uma unidade do Grupo Serra Geral, com litoestratigrafia diferenciada dos terrenos vulcânicos a leste, dos quais é separada pela zona de falhamentos transcorrentes Jaguari-Mata, de orientação NW (WILDNER *et al.*, 2003; WILDNER, 2004).

##### 4.2.3.1. Geologia do Bloco Fronteira Oeste e lavras visitadas

Bergmann *et al.* (2020), em pesquisa voltada à prospecção de gemas em geodos, cartografaram doze derrames de composição basáltica a andesítica na Formação Alegrete, onde quatro são portadores de mineralizações de ágata e apresentam potencial para a gema ametista.

A região conta com oito garimpos, cinco ativos, localizados no município de Santana do Livramento, cuja área corresponde à porção sul e central do bloco. Embora a lavra nesses empreendimentos implique em movimentação de grandes volumes de regolito, não se observam rochas frescas em pilhas de descartes de mineração, uma vez que os garimpos da região exploram ágatas em níveis rasos dos depósitos. No entanto, nos jazimentos de nível mundial da Província Los Catalanes,

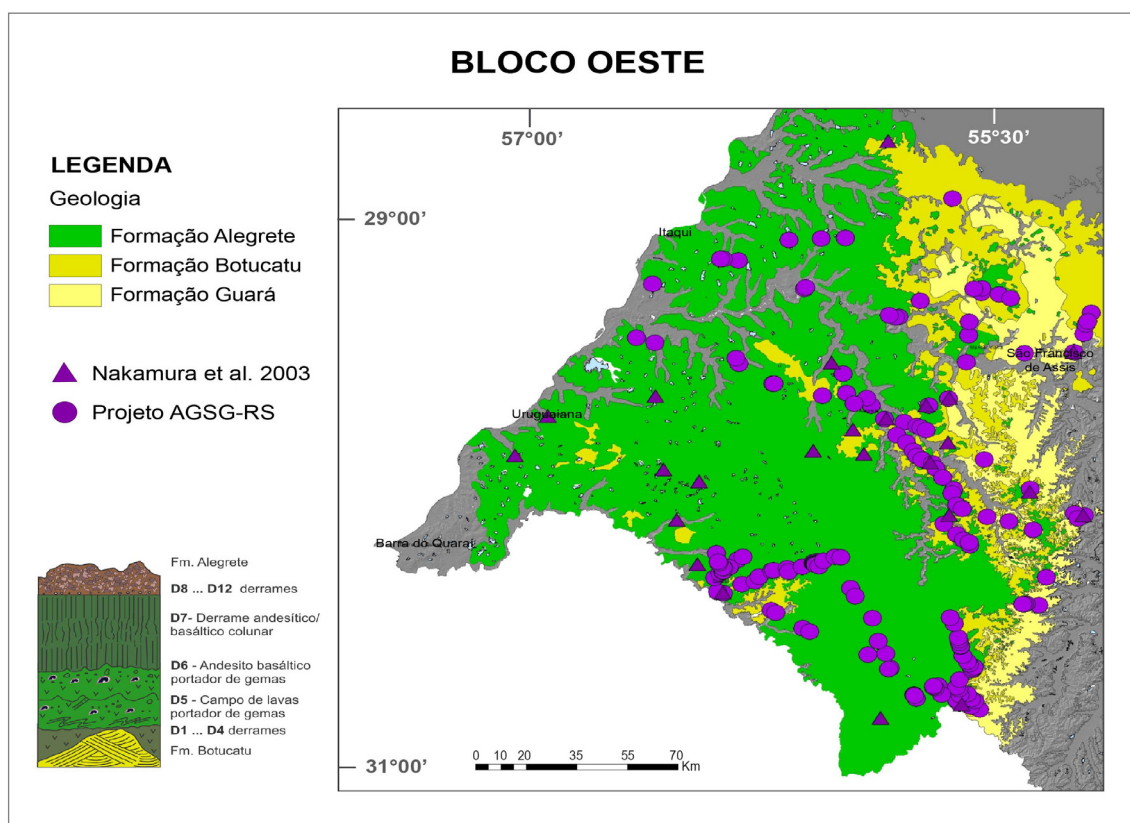


Figura 4.16 - Mapa geológico simplificado e estratigráfico ou coluna estratigráfica esquemática do Bloco Fronteira Oeste, mostrando a distribuição das amostras coletadas (círculos) e compiladas (triângulos) pelo projeto.

no Uruguai, ocorre produção de ametistas em laje de rocha andesítica fresca situada imediatamente abaixo dos alteritos produtores de ágata.

Os derrames produtores são em parte contínuos em território brasileiro. O Modelo Prospectivo para Ametista e Ágata na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul (BERGMANN *et al.*, 2020) apontou a ocorrência de geodos de ametista em uma vasta região do Bloco Fronteira Oeste e a depender do incremento da exploração de gemas, existe a perspectiva futura de descartes de mineração com rochas de composição andesítica a andesito-basáltica.

A primeira unidade da pilha vulcânica que apresenta mineralização de gemas em geodos é o quinto derrame da Formação Alegrete (Unidade D5), conhecido no Uruguai como derrame Catalán e tem composição andesítica.

No país vizinho, esse derrame sedia a maior parte das lavras produtoras de gemas e conta com rochas dispostas em extensas pilhas de descartes (Figura 4.17A), onde se misturam brechas da crosta superior

de derrame (capa dos geodos) e rochas da zona central (encaixantes da mineralização).

Outras unidades portadoras de geodos são os derrames D6, de composição andesito-basáltica, e D8, de mesma afiliação composicional. O derrame D9, de composição andesítica, é o último com geodos de tamanho decimétrico na pilha vulcânica da Formação Alegrete. Todas as unidades com potencial para a produção de gemas são derrames de morfologia *rubbly pahoehoe* com brechas de topo que foram, em parte, caracterizadas como agrominerais no Capítulo 5.

As rochas encaixantes de geodos têm sílica entre 52 e 57% e soma de bases entre 10 e 17%, teores de  $K_2O$  entre 1,37 e 2,8%, não possuem quartzo normativo e não apresentam EPT em teores acima da norma, o que as caracteriza como remineralizadores de solos.

No Bloco Fronteira Oeste foram visitadas lavras para agregados, implantadas na maioria em rochas basálticas a andesito-basálticas de corpos do tipo *sill*.

A Pedreira Capillheira, na periferia norte da cidade de Santana do Livramento (Figura 4.17B), explora um



**Figura 4.17** - (A) Lavra Cordillera, Uruguai. Notar em primeiro plano rochas encaixantes de geodos e brechas de topo de derrame (provenientes do teto das galerias de lavra) em pilha de rejeitos. (B) Pedreira Capilheira, na periferia norte de Santana do Livramento. Lavra de grande porte em *sill* de andesito basáltico. (C) Mineração Aprato, entre Rosário do Sul e Alegrete, Lavra em pequeno *sill* basáltico. (D) Pedreira Santa Rita, nas proximidades de Quaraí. Lavra de porte médio no terceiro derrame local.

provável *sill* de composição andesito-basáltica, se constituindo em um dos maiores empreendimentos de lavra para agregados desse bloco. As rochas lavradas apresentam teor de SiO<sub>2</sub> de 54,4%, soma de bases de 14,5%, e não portam EPT acima do permitido ao emprego agrícola. O teor de K<sub>2</sub>O de 1,9% as enquadra nos requisitos de remineralizadores de solos. Outras lavras visitadas no bloco foram: a Mineração Aprato, na margem da rodovia BR-290, entre as cidades Rosário do Sul e Alegrete, e a Pedreira Santa Rita, nas imediações de Quaraí (BR 293).

A Mineração Aprato explora um *sill* de pequenas dimensões intrusivo em rochas sedimentares do Grupo Rosário do Sul e tem uma praça de lavra de diâmetro aproximado de 100 metros (Figura 4.17C).

A rocha de composição basáltica (SiO<sub>2</sub> 51,5%) tem soma de bases por volta de 17% e teor de K<sub>2</sub>O 1,1%, além de cumprir a norma quanto aos teores de EPT.

Já a rocha da Pedreira Santa Rita, que corresponde ao derrame D3 da Formação Alegrete, apresenta soma de bases em torno de 18,4% e EPT dentro dos limites requeridos, apesar de seu teor de K<sub>2</sub>O de 0,86% ficar abaixo da exigência da norma. Essa lavra tem porte razoável, com diâmetro em torno de 300 metros e bancadas de 11 metros de altura (Figura 4.17D).

#### 4.2.3.2. Tratamento dos dados litoquímicos das rochas do Bloco Fronteira Oeste

No Bloco Fronteira Oeste são apresentadas análises químicas para um total de 30 amostras, onde 10 são basaltos, 17 são andesitos basálticos e três são andesitos.

As amostras têm soma de bases (SB) entre 9,83 e 18,00%, sendo que 100% das rochas cumprem o critério de SB<sub>≥</sub>9% de Brasil (2016) e 67% das amostras analisadas apresentam K<sub>2</sub>O<sub>≥</sub>1%.

Os teores de elementos potencialmente tóxicos (EPT) atendem aos limites de Cd, e Pb, e para uma parte das amostras não estão disponíveis análise para Hg. Uma das amostras de basalto deste domínio apresentou teor de As de 14%, próximo ao limite permitido pela norma, que é de 15%.

#### 4.2.4. Bloco Região Norte

O Bloco Região Norte (Figura 4.18) corresponde à região do Alto Uruguai, cuja geologia é conhecida apenas em grandes traços. Predominam os terrenos atribuídos à Formação Paranapanema (WILDNER *et al.*, 2004), ocorrendo na parte nordeste, uma extensa área da Formação Esmeralda (WILDNER *et al.*, 2004; ROSSETI *et al.*, 2018), além de porções restritas de rochas vulcânicas ácidas da Formação Palmas (ROSSETI, 2018).

#### 4.2.4.1. Geologia do Bloco Região Norte e lavras visitadas

A Formação Paranapanema foi descrita por Wildner *et al.* (2004) como um conjunto de derrames da afiliação química alto-Ti, com secção-tipo entre Iraí e Frederico Westphalen, e entre Soledade e Ametista do Sul. Esta unidade litoestratigráfica sedia os derrames produtores de ametista e ágata que compõem a província gemológica do Distrito Mineiro de Ametista do Sul, com jazidas de classe mundial.

Na unidade predominam rochas de composição basáltica. Trabalhos realizados em Santa Catarina, no Paraná e no Rio Grande do Sul, como os projetos Oeste de Santa Catarina (FREITAS; CAYE; MACHADO, 2002), Geologia e Recursos Minerais do Sudoeste do Estado do Paraná (WILDNER *et al.*, 2006) e Geologia e Recursos Minerais da Folha Três Passos em escala 1:100.000 (BERGMANN; PROVENZANO, 2014) registraram a cartografia de fácies da Formação Paranapanema.

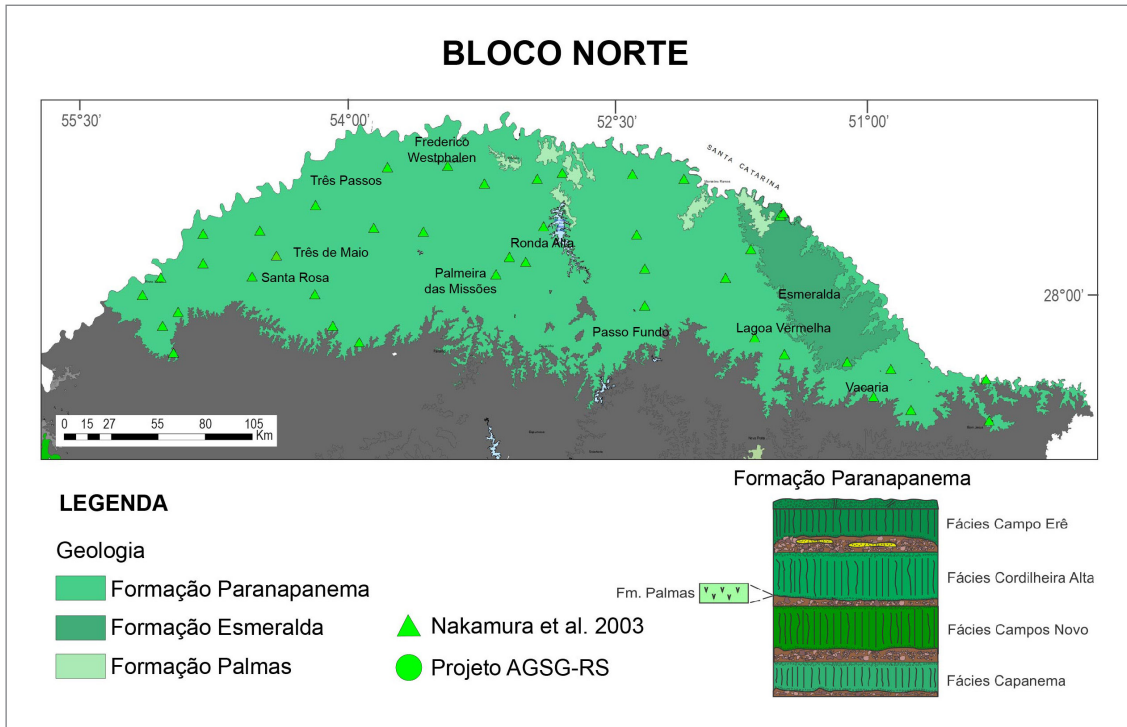
Na região do Alto Uruguai, a unidade pode ser desmembrada em quatro fácies a partir da base (Coluna esquemática da Figura 4.18): Fácies Capanema, conjunto de derrames compostos com alto conteúdo de voláteis, constituídos de basalto hipocristalino; Fácies Campos Novos, com basalto granular holocristalino, verde-escuro a preto, crosta de alteração amarela e com eventuais pintas de cobre nativo; Fácies Cordilheira Alta, derrames com disjunção colunar bem desenvolvida, constituídos por andesito basáltico holocristalino; e Fácies Campo Erê, com derrames inflados tipo alto volátil de composição andesito-basáltica.

Ainda ocorre a Formação Esmeralda, que apresenta secção-tipo entre Esmeralda e Cacique Doble, composta por basaltos do grupo baixo Ti microgranulares finos a afaníticos, com pequenas vesículas arredondadas à opala negra e celadonita.

As lavras visitadas na região do Alto Uruguai se restringiram a cinco empreendimentos produtores de agregados na folha Três Passos, além de duas lavras de ametista no DMAS, na folha Frederico Westphalen. Os demais dados litoquímicos foram compilados do trabalho de Nakamura *et al.* (2003).

Na Pedreira do Bairro Leão (Figura 4.19B), situada entre as cidades de Frederico Westphalen e Três Passos, foi amostrada rocha da Fácies Campos Novos, de composição basáltica (SiO<sub>2</sub> 49,6%), cuja soma de bases atinge 16,5%, mas cujo teor de K<sub>2</sub>O (0,98%) ficou abaixo da normativa.

Próximo à cidade de Barra do Guarita (Figura 4.19B) foi caracterizado derrame basáltico da Fácies Campos Novos, de características químicas semelhantes e com potencial para rocha ornamental, que não atingiu o limite inferior de K<sub>2</sub>O por sete centésimos. Uma terceira rocha da Fácies Campos Novos alcançou resultados semelhantes.



**Figura 4.18** - Mapa geológico simplificado e coluna estratigráfica esquemática do Bloco Fronteira Oeste, mostrando a distribuição das amostras coletadas (círculos) e compiladas (triângulos) pelo projeto.

O conjunto de amostras Campos Novos não apresentou teores impróprios de EPT, além de não evidenciar teores relevantes de Cr e Ni (elementos que podem ter restrição agrícola). Todas estas as lavras têm pequeno porte e operação intermitente. Embora não se enquadrem na normativa de remineralizadores de solos (BRASIL, 2016), os litotipos podem se constituir em fertilizantes simples fontes de Ca e Mg.

As análises das rochas do derrame da Pedreira Alves (Figura 4.19C), em Erval Novo, próximo da cidade de Três Passos, revelaram teor de SiO<sub>2</sub> de 50,52%, soma de bases por volta de 15% e K<sub>2</sub>O atingindo 1,3%. O derrame pertence à Fácies Cordilheira.

A lava de rachão e cantaria da Prefeitura de Três Passos (Figura 4.19D), empreendimento de médio porte, nas imediações a leste da cidade, propiciou a coleta de amostra em um derrame espesso (> 40 m), também do Fácies Cordilheira, que apresenta juntas colunares decimétricas. O derrame acusou SiO<sub>2</sub> em teor de 50,6% e soma de bases por volta de 15%, com K<sub>2</sub>O atingindo 1,3%. Ambas as amostras da Fácies Cordilheira não apresentaram EPT ou teores elevados de Cr e Ni, elementos que podem ter restrição para uso em agricultura.

No Bloco Região Norte se destaca o Distrito Mineiro de Ametista do Sul (DMAS) com depósitos de classe mundial de gemas em geodos, explorados para a produção de ametista em galerias subterrâneas. O conjunto de mais de 600 lavras, com operação em parte intermitente, gera extensas pilhas de descartes de rocha basáltica.

Korchagin; Caner e Bortoluzzi (2019) analisaram amostras de cinco lavras do derrame Veia Alta, que tem a maior produção entre os três derrames explorados no DMAS. De acordo com os autores a homogeneidade química e mineralógica das rochas é favorável em termos de sua potencialidade agromineral. As rochas concentram um conteúdo ligeiramente maior de argilominerais (esmectita e celadonita) em amostras coletadas próximas a geodos e, de maneira geral, se enquadram na categoria dos remineralizadores de solo, com soma de bases superior a 9% e K<sub>2</sub>O por volta de 1,1%.

A pesquisa apontou para o enriquecimento em Mg, P e K na fração argila das rochas cominuídas, o que corresponde à maior proporção de argilominerais (esmectita e celadonita).

#### 4.2.4.2. Tratamento dos dados litoquímico das rochas do Bloco Região Norte

O Bloco Região Norte conta com resultados litoquímicos para 207 amostras de rochas, sendo elas 140 basaltos, 58 andesitos basálticos, dois andesitos e sete rochas traquíticas. Quanto aos critérios estabelecidos pela norma vigente (BRASIL, 2016), as amostras têm soma de bases (SB) entre 10 e 24,9%, cumprindo em sua totalidade o limite inferior de SB ≥ 9%. Os teores de K<sub>2</sub>O, em 75% das amostras, as enquadra como remineralizadores de solos, apresentando K<sub>2</sub>O ≥ 1%. Os teores de elementos potencialmente tóxicos (EPT) das rochas do



**Figura 4.19** - (A) Lavra de basalto da Fácies Campos Novos da Formação Parapanema. Bairro do Leão, entre Frederico Westphalen e Três Passos. (B) Lavra próxima à Barra do Guarita em basalto da mesma fácies. (C) Pedreira Pedro Alves, lavra em rochas da Fácies Cordilheira da Formação Parapanema. Proximidades da cidade de Três Passos. (D) Lavra de rachão e pedra de cantaria da Prefeitura de Três Passos, no mesmo fácies de (C). Derrame *rubbly pahoehoe* espesso com juntas colunares submétricas.

Bloco Norte atendem aos limites de As, e Pb. No entanto, 13 das amostras de basalto se apresentam impróprias para uso agrônômico em função dos teores de Cd, entre 11 e 15 ppm, sendo 10 ppm o limite máximo permitido pela normativa. Mesmo com a tolerância de 25%, a faixa dos valores obtidos para essas amostras aponta que elas não são adequadas para uso como remineralizadores de solos. Há uma grande probabilidade de que esse elemento potencialmente tóxico esteja contido na titanomagnetita, mineral da família dos espinélios e relativamente estável, embora sujeito à oxidação. Segue a ressalva de que para uma parte das amostras não está disponível análise para Hg.

#### 4.2.4.3. Resultados de ensaios agrônômicos com basaltos e dacitos do Grupo Serra Geral

Em experimento de incubação realizado com o dacito da Lavra Caxiense, Caxias do Sul, e com o basalto da lavra Carpenedo de Santa Rosa, Sander et al. (2019) testaram a eficiência de aceleradores de liberação de

cátions como ácido forte (água régia), ácido fraco (suco de limão), bórax e cama de aviário.

Os pós de rocha foram utilizados na proporção de 5 t/ha, em substrato de areia com 99% de quartzo. A solução obtida a partir das incubações foi analisada após 60 e 120 dias, para determinação de teores de nutrientes K, Ca e Na e micronutrientes/elementos traço (V, Cr, Co, Ni, Ba, Cu, Zn, Ti), assim como para elementos potencialmente tóxicos (As e Pb).

Os resultados apontam para uma maior reatividade do basalto, com íons de Zn, Co, Ni, Cu e Ca solubilizados, enquanto o dacito liberou K e Pb. Os melhores resultados foram obtidos com o ácido cítrico (38% de aumento de liberação de cátions em relação à testemunha sem aceleradores) e com a cama de aviário (aumento de 24% do total de cátions), que evidenciou a importância dos microrganismos nos processos de abertura dos minerais.

O tempo envolvido nos experimentos, dois e quatro meses, evidencia que a reatividade dos minerais de ambas as rochas é compatível com o ciclo das culturas.

O trabalho de Ramos *et al.* (2017) conduziu experimento de extração de nutrientes e soluções ácidas, a partir de dacito lavrado para obtenção de lajes para calçamento em Nova Prata. Os melhores resultados foram obtidos com emprego de solução de ácido oxálico a 1%, com a liberação de Fe, Ca, Al, P, Si, Mg, Na e K. Os autores relatam que não foi observada disponibilidade expressiva de elementos potencialmente tóxicos como As, Cd e Pb mesmo em meio fortemente ácido (pH 2-3).

### 4.3. AQUECIMENTO GLOBAL E AGRICULTURA

Observa-se uma necessidade premente de operar de forma mais sustentável a produção agrícola global, tendo em vista a limitação do aquecimento da temperatura global a menos de 2°C até o fim do século, como consta no Acordo de Paris.

O controle das emissões da queima de combustíveis fósseis não é considerado suficiente no cumprimento das metas internacionais, em um quadro onde agricultura, manejo florestal e outros usos do solo são responsáveis por 22% do total global das emissões de gases-estufa, como consta do *Special Report on Climate Change and Land*, relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, na sigla em inglês). O relatório discorre sobre a necessidade de reduzir o desmatamento e expandir áreas de floresta visando à captura de CO<sub>2</sub>, tudo isto em um quadro onde permanece a necessidade de se produzir alimentos para 10 bilhões de pessoas, que é a projeção para 2050, sem contar com a demanda de fontes de bio-combustíveis, já que não será imediata nem fácil a troca dos combustíveis fósseis por opções elétricas, por exemplo. "O Brasil pode ter uma grande oportunidade se souber equilibrar estes quatro pontos de maneira adequada e atendendo os interesses da população", é a mensagem diretamente dirigida ao país.

Dentro de novas estratégias para remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera, o uso de basaltos, portadores de silicatos de Ca e Mg, desponta mundialmente, sendo

esta uma rota tecnológica que é favorecida em climas tropicais e subtropicais.

A técnica ligada ao *Enhanced Weathering*, termo que pode ser traduzido como intemperismo aprimorado, constitui, basicamente, na larga escala de uso de silicatos de Ca e Mg em cultivos agrícolas, visando maximizar o sequestro de carbono da atmosfera através de um processo natural. Este mesmo processo já foi intensificado por razões climáticas em vários períodos da história geológica e corresponde à formação de plataformas carbonáticas em ambientes costeiros de clima quente.

O aumento em escala global de lixiviados alcalinos, capazes de reduzir a acidificação dos oceanos, atua de maneira a suprir grandes estoques de Ca na água do mar, favorecendo a proliferação de organismos com carapaças carbonáticas, que por sua vez se utilizam do CO<sub>2</sub> da atmosfera no processo.

O processo é descrito por Beerling (2018) e parte da premissa de que o CO<sub>2</sub> contido nos poros do solo é capaz de contribuir com dissolução de carbonatos e rochas silicáticas, liberando cátions de Ca e Mg, bem como o ânion bicarbonato e moléculas de carbonato, cujo destino final acaba por ser os oceanos. Estes por si só já se constituem em grandes reservatórios de carbono, cujo tempo de residência atinge a ordem de milhares de milhões de anos.

O processo de fixação de CO<sub>2</sub> ocorre no próprio ambiente do solo pela precipitação de carbonatos secundários, a partir dos cátions dissolvidos em águas de poros.

Benefícios adicionais são trazidos pela a proteção dos ambientes marinhos quanto ao processo de acidificação, já em curso devido às mudanças climáticas, e que vem afetando recifes corais e a biota marinha em geral.

Trabalhos recentes citam territórios de agricultura intensiva, que contam com rochas basálticas e infraestrutura de transportes e produção de finos de britagem, como essenciais à aplicação pioneira da técnica, condições amplamente preenchidas pela geologia das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.



## 5. ZEÓLITAS

### 5.1. PROPRIEDADES E USOS DOS MINERAIS DO GRUPO DAS ZEÓLITAS

As zeólitas são tectosilicatos aluminosos hidratados e portam cátions alcalinos e alcalino-terrosos (principalmente cálcio e sódio), em ligações atômicas fracas.

A estrutura típica dos minerais deste grupo é composta por um ou mais sistemas de poros que podem ser interligados por micro canais.

A unidade fundamental de sua estrutura cristalina é um tetraedro com átomos de O nos vértices e um átomo de Si no centro. As substituições isomórficas de Si<sup>4+</sup> por Al<sup>3+</sup> originam um déficit de cargas, responsável pela grande capacidade de troca catiônica (CTC) das zeólitas.

Além da CTC, outras propriedades são responsáveis pelo amplo emprego que os minerais do grupo das zeólitas têm em processos industriais e agronômicos, tais como: o potencial de adsorção de gases e vapores nos espaços de sua estrutura interna, que pode atingir a ordem de 400 m<sup>2</sup>/g, na variedade mordenita, assim como as propriedades catalíticas, referentes aos canais internos e às superfícies ativas (LUZ, 1995).

Os principais usos estão relacionados aos sistemas industriais como: tratamento de efluentes, tratamento de lixo doméstico, controle de odor e purificação de substâncias; na pecuária (nutrição animal e usos veterinários); na aquicultura (controle da concentração de amônia na piscicultura); e na agricultura, onde podem atuar em solos, minimizando as perdas de compostos nitrogenados, retendo umidade e evitando que nutrientes supridos por adubação sejam lixiviados precocemente.

O diâmetro das estruturas de poros determina a capacidade seletiva das diversas espécies de zeólitas para moléculas de diversos tamanhos, o que levou Mc Bain (1932) a cunhar o termo “peneiras moleculares” para as zeólitas. Esta propriedade é responsável por grande parte do uso industrial desses minerais. A demanda específica da filtração de determinadas substâncias determina a produção de variedades sintéticas, que são obtidas a partir de compostos de sílica e alumínio, como argilas aluminosas.

A alta estabilidade da estrutura cristalina das zeólitas, que podem suportar temperaturas de até 400°C (MUMPTON, 1984), amplia as possibilidades de sua reciclagem nos processos industriais. Já em usos agrícolas, apesar de sua alta estabilidade física, nas regiões tropicais e

subtropicais, as zeólitas podem ser solubilizadas e lixiviadas nos solos, principalmente em climas dominados por regime de pluviosidade alta.

As maiores fontes de minérios zeolíticos comercializados em todo o mundo provêm de ambiência sedimentar/diagenética (lagos salino-alcalinos) ou de cinzas vulcânicas, em ambos os casos, ligados a processos diagenéticos (SURDAM, 1977; BISCH; MING, 2001). Recentemente, tecnologias analíticas, como difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) aprimoraram os métodos de identificação e permitiram a descoberta de uma série de depósitos de granulação mais fina, que eram tomados por tufos vítreos ou tufos cineríticos (VAN STRAATEN, 2007).

Em função desta proveniência, tecnologias de tratamento e uso são desenvolvidas para minérios monominerais, assim como para as variedades que predominam nesses jazimentos, como clinoptilolita, mordenita, heulandita e analcima (CHIPERA; APPS, 2001).

Cuba é o país mais citado quanto ao pioneirismo e o emprego múltiplo de zeólitas, por contar com abundância e minérios de alto teor (podem ultrapassar o teor de 70% em bruto) e por ter desenvolvido tecnologias de concentração e uso, no entanto dirigidas às variedades mais comuns em seus minérios: clinoptilolita, mordenita, heulandita e analcima (RESENDE; ANGÉLICA, 1977). Outros países produtores são: China, República da Coreia, Japão e Estados Unidos, além de Hungria e Turquia.

A nomenclatura e as propriedades deste grande grupo de minerais, assim como especulações sobre sua gênese, são objetos de controvérsias na literatura geológica. No presente trabalho, foi adotada a nomenclatura recomendada pelo Subcomitê da Associação Mineralógica Internacional (COOMBS *et al.*, 1997).

### 5.2. OCORRÊNCIAS DE ZEÓLITAS EM BASALTOS E DACITOS DO GRUPO SERRA GERAL

Os basaltos amigdaloides são comuns em diferentes ambientes distribuídos ao longo da pilha vulcânica do Grupo Serra Geral. Ocorrem em lobos basálticos do tipo “S” (*spongy*), zonas vesiculares em crosta superior de derrames, em especial aqueles de composição basáltica, e como clastos em brechas de crosta superior de derrame.

Em muitos casos, os basaltos amigdaloides apresentam espessura, continuidade lateral e percentual de zeólitas suficientes para serem cogitados como fonte destes

minerais, desde que os usos projetados não requeiram alto teor de pureza, como por exemplo, nas práticas agrônômicas e na suinocultura, que é uma atividade pecuária de alto potencial poluente.

As assembleias minerais que preenchem as cavidades do tipo amígdala, nos topos de derrames do Grupo Serra Geral, incluem minerais dos grupos da sílica (quartzo, calcedônia e opala), dos carbonatos (calcita, ankerita), das esmectitas e outros argilominerais e do grupo das zeólitas. Uma grande diversidade de espécies de zeólitas é reconhecida em derrames de composição básica (SIMAS *et al.*, 1999; FRANK *et al.*, 2006; FRANK, 2008).

Os processos de preenchimento e a cristalização dos minerais da paragênese são atribuídos à percolação de fluidos magmáticos tardios, de soluções geradas durante a colocação de lavas e a sobrecarga de rochas vulcânicas (FARJALLAT; SUGUIO, 1966), de água da chuva (JUCHEM, 2009) e de água subterrânea (MORTEANI *et al.*, 2010).

Remanescentes de arenito zeolitizado ocorrem entre os lobos basálticos, como cordões de areia em cavidades magmáticas preenchidas por areia nos topos de derrames. Além disso, diques clásticos de areia zeolitizada podem ser observados com frequência nos basaltos do Grupo Serra Geral. Evidências observadas em campo e em lâminas petrográficas apontam para a possibilidade de sedimentos de origem eólica que ocupavam os vales interdunas na época da colocação do fluxo de lava, representarem importante fonte de sílica para a cristalização de zeólitas.

Água alcalina de alta salinidade aprisionada em sedimentos com contribuição vulcânica induz à cristalização de zeólitas diagenéticas em lagos de ambiente desértico (SURDAM, 1977). As zeólitas, entre outros silicatos, são relatados como minerais autigênicos gerados em sistemas hidrológicos abertos, que mostram trocas com água meteórica (SHEPPARD; HAY, 2001).

Esses fatos reforçam o papel das águas alcalinas ricas em cálcio do Sistema Aquífero Guarani (SAG, FOSTER *et al.*, 2009), hospedado em parte em arenitos da Formação Botucatu, e que permeiam as rochas vulcânicas sobrepostas, na gênese de zeólitas cristalizadas nas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral. Tanto a carga introduzida pela pilha de derrames sobre dunas de areia não consolidadas, como a interação natural entre águas meteóricas e o SAG, possibilitam as condições físico-químicas propícias à cristalização de zeólitas, o que pode ocorrer em cavidades no basalto e concentrar-se onde a percolação de fluidos é favorecida.

Embora as ocorrências sejam comuns na crosta superior vesicular dos fluxos basálticos do Grupo Serra Geral, as zeólitas mostram-se abundantes na extensa zona de contato entre o arenito de Botucatu e os lobos basálticos da Formação Torres (ROSSETTI *et al.*, 2018). Como consequência, o trabalho de campo concentrou-se

nessa unidade, um conjunto de lobos basálticos, que cobrem os arenitos da Formação Botucatu, mostrando afloramentos contínuos do litoral norte à região central do Rio Grande do Sul.

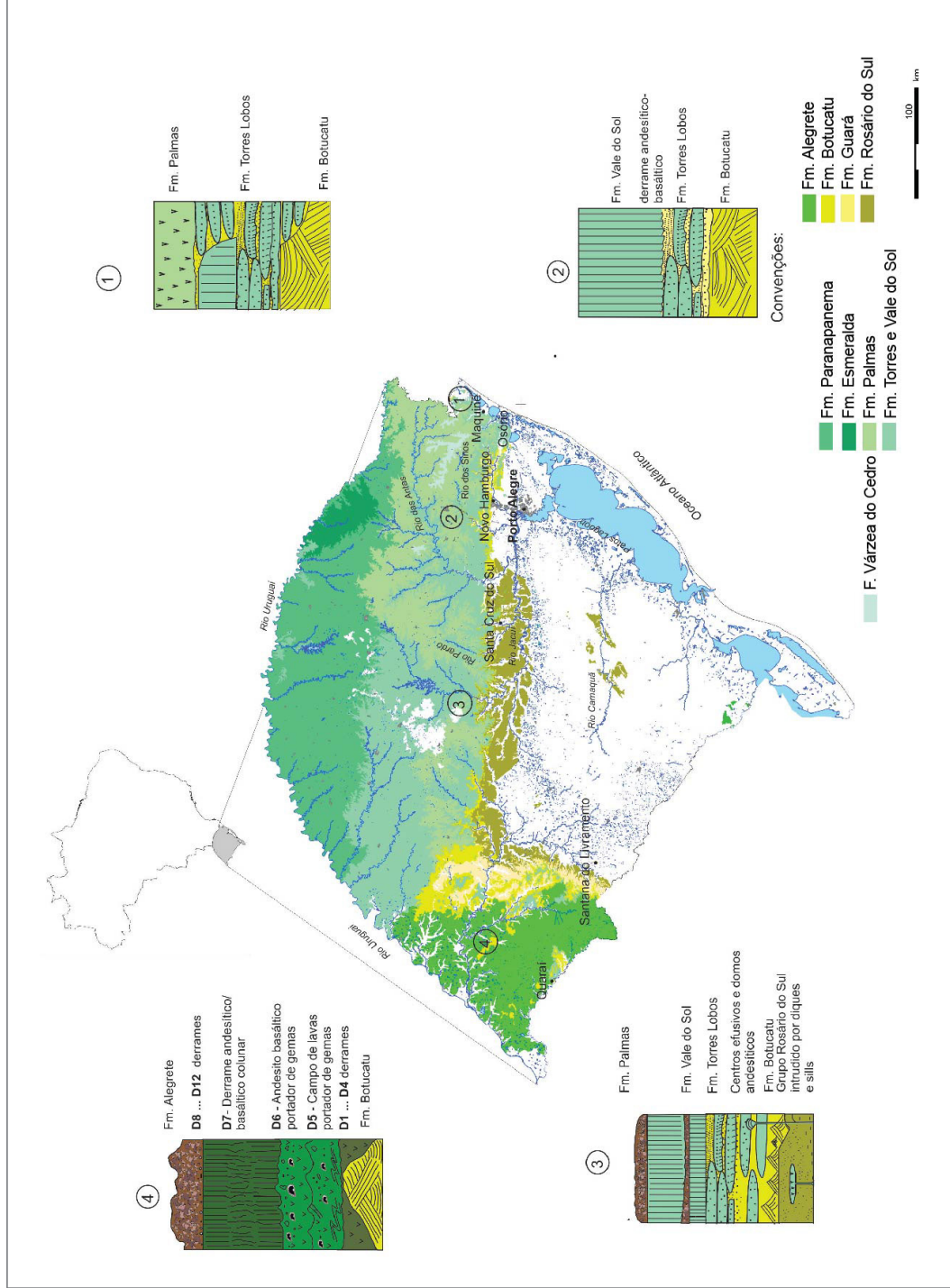
### 5.3. COMPARTIMENTAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS DE ZEÓLITAS EM BASALTOS AMIGDALOIDES NO RIO GRANDE DO SUL

Para a compartimentação das unidades estratigráficas e das paragêneses dominantes em diferentes regiões geográficas, quatro domínios foram estabelecidos ao longo do Rio Grande do Sul (Figura 5.1).

Nos domínios denominados Litoral Norte, Região Metropolitana de Porto Alegre e Central, as zeólitas se concentram nos lobos basálticos da Formação Torres, onde lavas interagiram com as areias eólicas de paleodunas e *intertraps* da Formação Botucatu ou, em quantidades menores, nas brechas de crosta superior dos derrames *rubbly pahoehoe* da Formação Vale do Sol. Já no domínio da Fronteira Oeste, em terrenos da Formação Alegrete, a calcita predomina sobre os minerais do grupo das zeólitas nas brechas que capeiam o quinto, sexto, sétimo e oitavo fluxos (D5, D6, D7, D8), estes também de morfologia *rubbly-pahoehoe*. A Tabela 5.1 resume as principais características das ocorrências de zeólitas nos diversos domínios, detalhadas a seguir.

No domínio Litoral Norte, a sequência de lobos atinge até 100 m no perfil Maquiné-Rolante (Figura 5.2A), sendo sobreposta por um fluxo espesso de andesito, localmente associado a feições semelhantes a cúpulas, com brechas cimentadas por zeólitas nas proximidades das cúpulas (Figura 5.2B). A zeólita predominante observada neste domínio é a laumontita (Figura 5.2C), cristalizada nas cavidades dos basaltos amigdaloides dos lobos ou como matriz de brechas, em associação com escolecita e heulandita e pequenas quantidades de minerais de sílica e calcita.

O domínio da Região Metropolitana de Porto Alegre abrange contatos entre os lobos basálticos da Formação Torres e os arenitos da Formação Botucatu nos municípios de Novo Hamburgo, Morro Reuter, Picada Café e Taquara (Figura 5.1). Os basaltos amigdaloidais são semelhantes aos do domínio Litoral Norte. Associam-se diques clásticos e intercalações de arenito com espessuras de centímetros a decímetros, onde se observam os arenitos zeolitizados como crostas de escolecita e laumontita (Figuras 5.2D, E). Os lobos basálticos são bem expostos nas pedreiras, onde a suscetibilidade ao intemperismo permite que sejam facilmente extraídos por maquinário do tipo raspadeiras. As assembleias de zeólitas nessa área incluem escolecita, heulandita e laumontita, nesta ordem de abundância, e podem ser estimadas em mais de 30% em volume (Figura 5.2F).



**Figura 5.1** - Mapa geológico esquemático do Rio Grande do Sul. Adaptado de Wildner (2009) e conceitos de Rossetti (2018). Esquemas Litoestratigráficos: (1) Domínio Litoral Norte, (2) Domínio Região Metropolitana de Porto Alegre, (3) Domínio Central e (4) Domínio Fronteira Oeste. Abreviações: Fm: Formação F; Fácies D: Derrame 1...12: Sequência de derrames. NH: Novo Hamburgo

**Tabela 5.1** - Principais características das ocorrências de zeólitas nos domínios geográfico-geológicos definidos neste estudo

DOMÍNIO	ZEÓLITAS (MINERAIS ACESSÓRIOS)	AMBIÊNCIA	FORMA DE OCORRÊNCIA
1 - Litoral Norte	Laumontita, escolecita, heulandita.	Lobos basálticos da Fm. Torres, em interação com areias eólicas ou brechas de crosta superior de derrames <i>rubbly pahoehoe</i> da Fm. Vale do Sol.	Preenchimento de cavidades de basaltos amigdaloides ou matriz de brechas.
2 - Região Metropolitana de Porto Alegre	Escolecita, heulandita, laumontita.	Contato entre lobos basálticos da Fm. Torres e arenitos da Fm. Botucatu.	Crostas zeolíticas desenvolvidas em corpos areníticos intercalados em basaltos amigdaloides.
3 - Central	Estilbita, heulandita, escolecita, mordenita.	Lobos pahoehoe da Fm. Torres e brechas de topo de derrames de morfologia <i>rubbly pahoehoe</i> da Fm. Vale do Sol.	Crostas de cimentação zeolítica em brechas nas margens de centros efusivos; preenchimento de amígdalas; crostas zeolíticas em corpos areníticos ou em bolsões de areia eólica aprisionados nos derrames.
4 - Fronteira Oeste	Heulandita, mordenita, escolecita, estilbita, estelerita. (calcita - predominante sobre as zeólitas, argilominerais, opala).	Formação Alegrete, brechas superiores dos derrames <i>rubbly pahoehoe</i> D5, D6, D7 e D8.	Associação com brechas de cimento calcítico.

O Domínio Central está localizado no centro do Rio Grande do Sul e foi caracterizado nos perfis entre camadas vermelhas continentais triássicas do Grupo Rosário do Sul, ao sul, e as rochas vulcânicas ácidas da Formação Palmas, ao norte. As concentrações de zeólitas no domínio Central ocorrem, principalmente, nos lobos *pahoehoe* da Formação Torres e nos topos de derrames de morfologia *rubbly pahoehoe* da Formação Vale do Sol (ROSSETTI *et al.*, 2017).

Ao norte da cidade de Santa Cruz do Sul, são encontrados prospectos de zeólitas relacionados a brechas nas margens de estruturas que são possíveis centros efusivos, expostos na forma de diques ou cúpulas, como o corpo aflorante na Pedreira Ouro Preto. As brechas podem apresentar crostas de zeolita estilbita cimentando clastos de basaltos amigdaloides (Figura 5.3A, B), enquanto a heulandita ocorre no preenchimento de amígdalas.

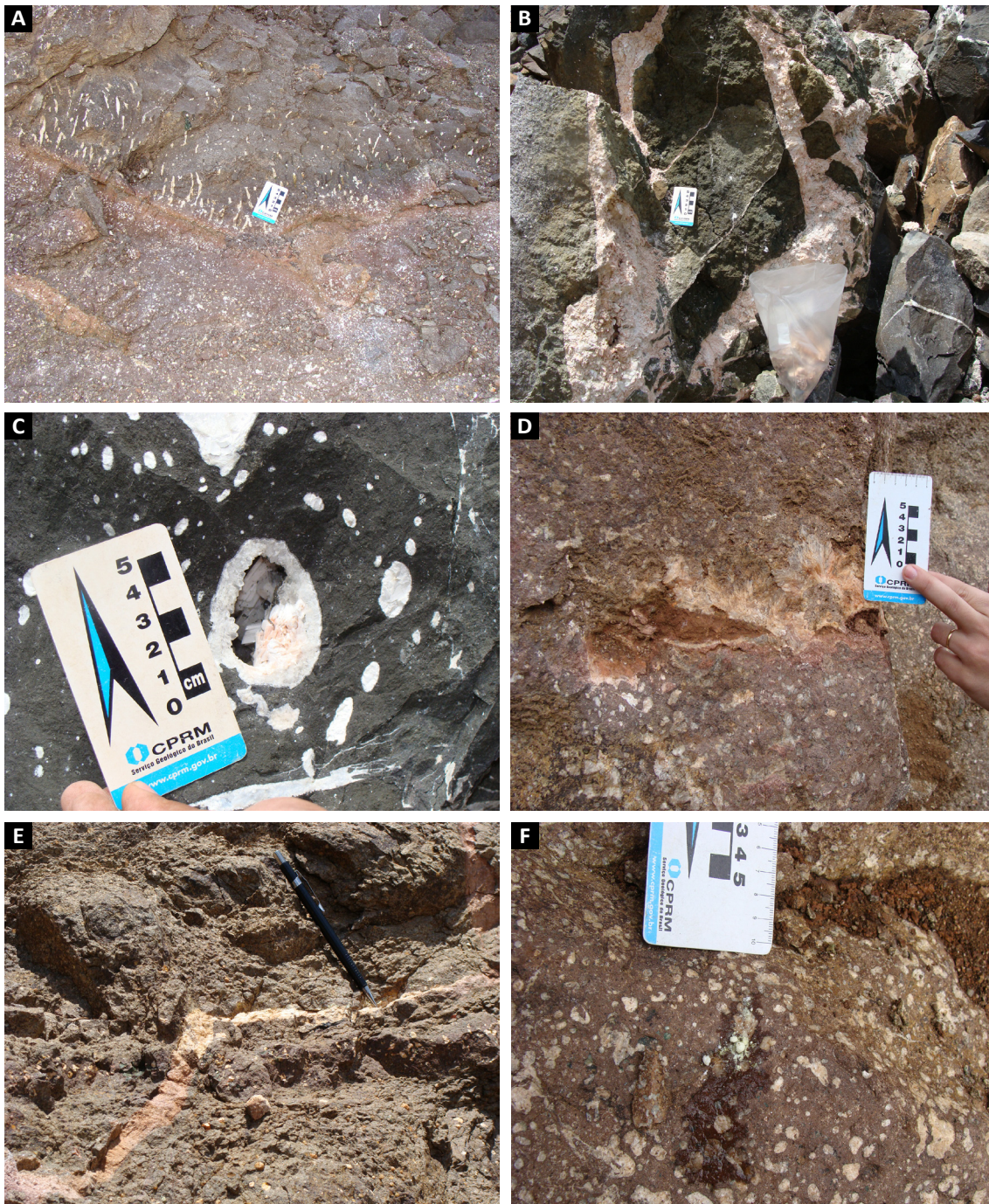
Também se encontram boas exposições de basaltos amigdaloides ao sul da mesma cidade, em pedreira desativada no distrito de Fátima e em muitas cavas para rachão, igualmente desativadas, da Estrada do Fray. Essas rochas, geralmente, estabelecem limites de aproveitamento para a atividade de mineração em profundidade, uma vez que as rochas adequadas à produção de cascalho estão presentes acima, em um derrame de andesito basáltico. Nas rochas amigdaloides as paragêneses de preenchimento de cavidades e das crostas em brechas de topo de derrame incluem, principalmente, estilbita, heulandita e escolecita e, em menor quantidade, mordenita e calcita. Argilominerais e calcedônia também estão presentes, em pequena proporção.

A quantidade de cavidades pode exceder 30% do volume da rocha (Figura 5.3B, C). Os lobos da Formação Torres e os derrames de morfologia *rubbly pahoehoe* da Formação Vale do Sol encontram-se expostos em muitas

estradas secundárias ao longo do domínio central, mas os melhores afloramentos podem ser acessados na BR 153 (perfil Vale do Sol-Herveiras).

Neste trajeto, o conjunto de lobos, de espessuras decimétricas a métricas, apresenta mergulho primário entre 10° e 20° para norte e aflora no topo de uma camada de poucos metros de espessura de arenitos da Formação Botucatu. Os arenitos se encontram afetados termicamente por lavas e perturbados por tectônica gravitacional. Embora os arenitos não constituam pilhas espessas, eles geralmente estão presentes como *inter-traps*, sendo que o corpo mais consistente chega a formar uma pequena duna, capeando o primeiro lobo (Figura 5.3D). Lateralmente, a duna passa a um cordão de areia, com zeolitização parcial a total (Figura 5.3E). A zeólita heulandita foi determinada em análise difratométrica da amostra (Capítulo 5, item 5.4.2). A sequência de lobos (Figura 5.4A) perfaz uma pilha com espessura de 200 m ao longo da rodovia BR-153, onde o processo de *mingling*, entre lava basáltica e areia avulsionada, sugere a contemporaneidade do avanço da frente de lavas pahoehoe e o aporte de areias por vento. As feições resultantes de *mingling* incluem clusters de areia zeolitizada em meio a amígdalas (Figura 5.4B). Diques clásticos e todo um conjunto de fraturas percoladas por areia também podem ser encontradas. Estas feições são recorrentes entre lobos basálticos acima, mas as intercalações se tornam restritas a cordões de areia, o que pode indicar a fixação e o soterramento das fontes de sedimento pelas lavas.

A principal assembleia mineral nos lobos da Formação Torres no domínio Central é composta por heulandita, estilbita e escolecita, ocorrendo ainda mordenita e calcita, além de esmectita e minerais de sílica, estes restritos. As brechas de crosta superior dos derrames da Formação Vale

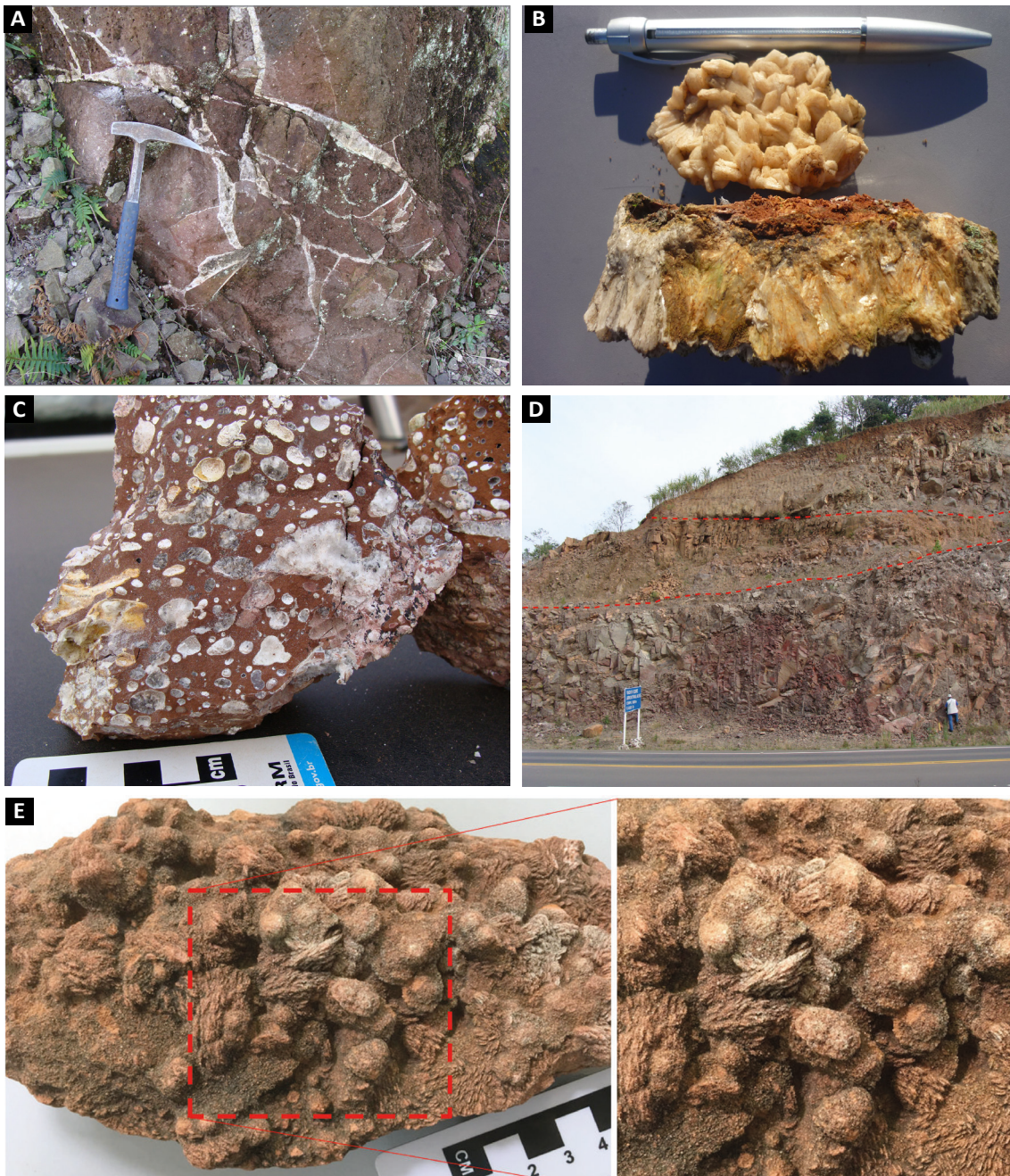


**Figura 5.2** - (A) Contato de lobos S (spongy, abaixo) e P (pipes). Saibreira Boa Vista, Maquiné; (B) Brecha cimentada por laumontita, Pedreira José Inácio, Morro Alto, município de Osório; (C) Cristais de laumontita dentro de cavidade revestida por quartzo em basalto. Saibreira Lino, Santo Antônio da Patrulha; (D) Intercalações delgadas de arenito entre lobos, mostrando crostas de escolécita na parte superior. Saibreira Ramisch, Morro Reuter; (E) Dique clástico com topo zeolitizado, Saibreira Picada Café; (F) Basalto amigdalóide com conteúdo de zeólitas estimado em 30% em lobo S. Saibreira Ramisch, Morro Reuter.

do Sol mostram cimentação por calcita, e secundariamente pelas mesmas zeólitas que ocorrem preenchendo cavidades nos clastos de basaltos amigdalóides. A proporção de cimento nas brechas varia entre 5 e 20% em volume.

O domínio Fronteira Oeste compreende a Formação Alegrete, que consiste nos terrenos vulcânicos do Grupo Serra Geral, na porção oeste do Rio Grande do Sul (Figura 5.1).

A província gemológica de classe mundial, conhecida como distrito gemológico Los Catalanes, produtora de ametista e ágata, no Uruguai, foi avaliada como contínua entre o país vizinho e a região da fronteira oeste do Rio Grande do Sul (HARTMANN *et al.*, 2010; BERGMANN *et al.*, 2020). As assembleias minerais nas brechas dos derrames D5, D6, D7 e D8 são dominadas por calcita, associada com heulandita, mordenita,



**Figura 5.3** - (A) Crostas de estilbita cimentando clastos de basalto amigdalóide no bordo de estrutura do tipo domo andesítico. Pedreira Ouro Preto - Santa Cruz do Sul; (B) Aspecto de crostas de estilbita. Acima: Crosta proveniente de pedreira do distrito de Fátima, e, abaixo, da Pedreira Ouro Preto, Santa Cruz do Sul; (C) Basalto amigdalóide da Formação Torres, amostrado no piso da Pedreira Bairro Fátima: heulandita e zeólita fibrosa mordenita preenchendo cavidades do tipo amígdala; (D) Sequência de lobos basálticos da Fm. Torres, com duna intertrápica (linhas pontilhadas). RSC-471, 6 km a norte de Vale do Sol. (E) Arenito zeolitizado com detalhe mostrando arranjos de mineral placóide, determinado como heulandita em DRX.

escolécita, estilbita e estelerita (as duas últimas subordinadas). Argilominerais e opala hialita também estão presentes.

O derrame número cinco, de composição andesítica, é o principal produtor de gemas no Brasil e no Uruguai, onde brechas podem ser encontradas em pilhas de descarte de mineração. No Brasil, as brechas estão expostas ao longo da rodovia BR-393, entre as cidades de Santana do Livramento e Quaraí. As obras de construção de

usinas de energia eólica (Cerro Chato II e III) permitiram amostrar brechas cimentadas por calcita capeando o derrame D5. (Figura 5.4C).

O derrame sobreposto D6 foi identificado como derrame portador de gemas, embora ainda não esteja em produção. As brechas de crosta superior de derrame, em ambas as unidades, mostram continuidade lateral notável e podem ser seguidas no campo por dezenas de km<sup>2</sup>, com quebra de relevo nítida nas encostas.



**Figura 5.4** - (A) Sequência de lobos métricos alternando cores cinza e rosadas em lobos “S”, mais oxidados. RSC-471, 6,5 km ao norte de Vale do Sol; (B) Fragmentos de arenito em rocha basáltica. Mesmo afloramento de (A); (C) Brecha de crosta superior de derrame *rubbly pahoehoe*, cimentada por calcita. Complexo Eólico Cerro Chato II, BR-293, Cerro Chato; (D) Brecha de topo do derrame *rubbly pahoehoe* “D8”, exibindo mais de 30% em volume de cimento calcítico. Pedra Grande, a W do Passo da Guarda, limite dos municípios de Quaraí e Santana do Livramento.

A espessura das brechas pode chegar a sete metros em certos locais, notadamente em locais estéreis para a mineralização de gemas, mas o derrame D8, que não é portador de gemas, mostra a brecha mais espessa, ultrapassando localmente 30 m no monólito da Pedra Grande, município de Quaraí. Neste local, o afloramento de diferentes níveis de brecha sustenta a topografia, expondo na parte inferior clastos de basalto amigdalóide cimentados por calcita poiquilótópica e acima horizontes com cimentação zeolítica (Figura 5.4D). A brecha mostra-se lateralmente contínua por muitos quilômetros, embora com menor espessura.

#### 5.4. DISCUSSÃO DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICOS

Lobos representam a primeira hierarquia dentre os produtos de efusão de lavas, são corpos de lava individualizáveis, de espessura reduzida, que podem compor, por aglutinação, um derrame (SELF *et al.*, 1997).

Diferentes estudos mostram divergências acerca do tempo de colocação dos derrames *pahoehoe* compostos.

Enquanto Anderson *et al.* (1999) sugerem uma colocação na ordem de um dia a uma semana, autores como Thordarson e Self (1998) propõem uma colocação mais lenta (01 a 10 anos) por processos endógenos. A grande espessura de alguns derrames e a abundância de fluxos compostos nos basaltos da Província Central Atlântica (CAMP) da Bacia de Argana, no Marrocos, apontam para processos eruptivos continuados durante vários episódios, ao invés de uma instalação rápida para a pilha de derrames compostos (El HACHIMI *et al.*, 2011).

Wilmoth e Walker (1993) descrevem, como lobos tipo “S” (*spongy*), os derrames delgados que não possuem vesículas tubulares e são vesiculares ao longo de sua espessura, enquanto os lobos do tipo “P” são caracterizados por vesículas em pipe na base do fluxo, e por estrutura interna típica com base e topo vesiculares, sendo o núcleo pobre em cavidades.

A predominância de lóbulos do tipo P em derrames compostos pode estar relacionada a escapes de línguas de magma, por rupturas da crosta viscosa de derrames *pahoehoe* inflados na sua frente de avanço (HON *et al.*, 1994, 2003). De acordo com Wilmoth e Walker (1993),

esses lobos podem ser encontrados em quase todos os campos de derrames de morfologia *pahoehoe*, mas são comuns em superfícies de baixa declividade. A proporção de vesículas relativamente menor dos lobos “P” indica que as lavas responsáveis por esta tipologia tiveram tempo de permanência suficiente em um sistema distributário de lava antes da efusão, o que permite que quantidades consideráveis de vapor sejam exsolvidas (WILMOUTH; WALKER, 1993; OZE; WINTER, 2005).

Alternativamente, para Hon *et al.* (1994), o maior conteúdo de voláteis dissolvidos dos lobos P decorre da presença de sua crosta mais densa, capaz de manter a pressão interna e reabsorver os voláteis ao invés de promover a formação de bolhas. Esta categoria de lobos estaria, preferencialmente, associada a break-outs de frentes de derrames *pahoehoe* inflados (HON *et al.*, 1994; El HACHIMI *et al.*, 2011).

Em afloramentos da Formação Torres, observou-se repetidas vezes que os lobos “S” mostram inclinações entre 10° e 20°, embora possam também ocorrer como bancos sub-horizontais. Este fato corrobora a associação comum descrita na literatura geológica dos lobos “P” a terrenos de declividade inferior a 4° (HON *et al.*, 1994), enquanto os lobos “S” podem se desenvolver em declividades mais acentuadas.

A alternância de lobos P e S na Formação Torres, ao longo das regiões litorânea e central do Rio Grande do Sul, pode refletir a paleotopografia e a tectônica contemporânea do magmatismo. A tendência geral, observada em perfis dos blocos Litoral Norte, Região Metropolitana de Porto Alegre e Região Central, é a predominância dos lobos “S” na base da pilha vulcânica, o que corresponde à fase em que o relevo ainda não está totalmente preenchido pelos fluxos vulcânicos. Outros fatores, como falhamentos gravitacionais, que são particularmente abundantes em bordas de bacia, e, no caso, nas bordas da pilha vulcânica, podem ser relativos ao ajuste de carga que o peso diferencial das rochas basálticas provoca sobre o substrato sedimentar da Bacia do Paraná.

As brechas de topo de derrame, da Formação Vale do Sol e da fronteira oeste do Rio Grande do Sul, correspondem ao retrabalhamento por fluxo da crosta superior de derrames de morfologia *rubbly-pahoehoe*.

A presença conspícua de sedimentos entre os clastos das brechas, em parte zeolitizados ou em processo de transformação em cimentos calcíticos, indica tanto o aporte sedimentar siliciclástico contemporâneo ao fluxo das lavas, como a atuação de processos diagenéticos sobre a pilha de derrames.

Quanto às paragênese minerais observadas em basaltos amigdaloides e cimento de brechas, as ocorrências e os prospectos são semelhantes, em parte, aos

dos basaltos cenozoicos da Islândia, descritas como de ambiente metamórfico de baixo grau.

Neuhoff *et al.* (1999), estudando testemunhos de sondagem, definem estágios sequenciais de preenchimento de poros e cavidades em sistemas geotérmicos associados a vulcões e diques e apontam o zoneamento mineralógico entre espécies de argilominerais e zeólitas, controlado pela profundidade de soterramento da pilha vulcânica.

Chipera e Apps (2001) descreveram o mecanismo de formação de zeólitas a partir de vidros, considerado um processo ativo na maioria dos ambientes formadores de zeólitas, a exemplo dos tufos vulcânicos. A ocorrência de grandes quantidades de zeólitas em rochas ricas em vidro é típica de lobos e topos de derrame, onde as zeólitas não se limitam às amígdalas, mas permeiam toda a rocha, ocupando os espaços angulares entre os grãos minerais magmáticos e, frequentemente, substituindo o feldspato.

As variedades aluminosas de zeólitas (natrolita, mesolita, escolecita e thompsonita) são descritas como típicas de depósitos hidrotermais associados a rochas máficas. Nas rochas vulcânicas ácidas, as assembleias de baixa temperatura relatadas são clinoptilolita, analcima, mordenita, erionita, phillipsita, chabasita e heulandita, enquanto a laumontita, wairakita e yugawaralita são dominantes em alta temperatura ( $T > 150\text{ °C}$ ) (CHIPERA; APPS, 2001). As assembleias de zeólitas encontradas nos basaltos do Grupo Serra Geral compreendem variedades que a bibliografia atribui às rochas vulcânicas ácidas e apontam para uma atividade incomum de sílica nas soluções mineralizantes de rochas básicas. Assim, a natureza toleítica dos basaltos, similar aos da Islândia, e sua associação com o espesso pacote de arenitos da Formação Botucatu, devem ser consideradas como fontes das soluções siliciosas.

## 5.5. RESULTADOS ANALÍTICOS

### 5.5.1. Espectroscopia de Reflectância (ER) Aplicada à Identificação de Zeólitas no Grupo Serra Geral

As análises de espectroscopia de reflectância (ER), realizadas nas amostras de minerais do grupo das zeólitas coletadas nos domínios geológicos estudados do Grupo Serra Geral, tiveram como objetivo a definição de assinaturas espectrais características dos diferentes membros do grupo e a identificação de feições distintivas entre eles. Apesar de hábitos bem particulares, que permitem a distinção entre a maioria das diferentes zeólitas em campo e laboratório, com ajuda de lupas de aumento, nem sempre os cristais estão suficientemente desenvolvidos para a adequada identificação. A morfologia fibrosa pode induzir à identificação equivocada em algumas



variedades de zeólitas. Para o correto uso agrônomo, as propriedades cristalográficas e variações químicas devem ser conhecidas, além do que é necessário descartar a possibilidade de ocorrência significativa da variedade de zeolita fibrosa erionita, conhecida por causar danos à saúde humana quando da sua manipulação.

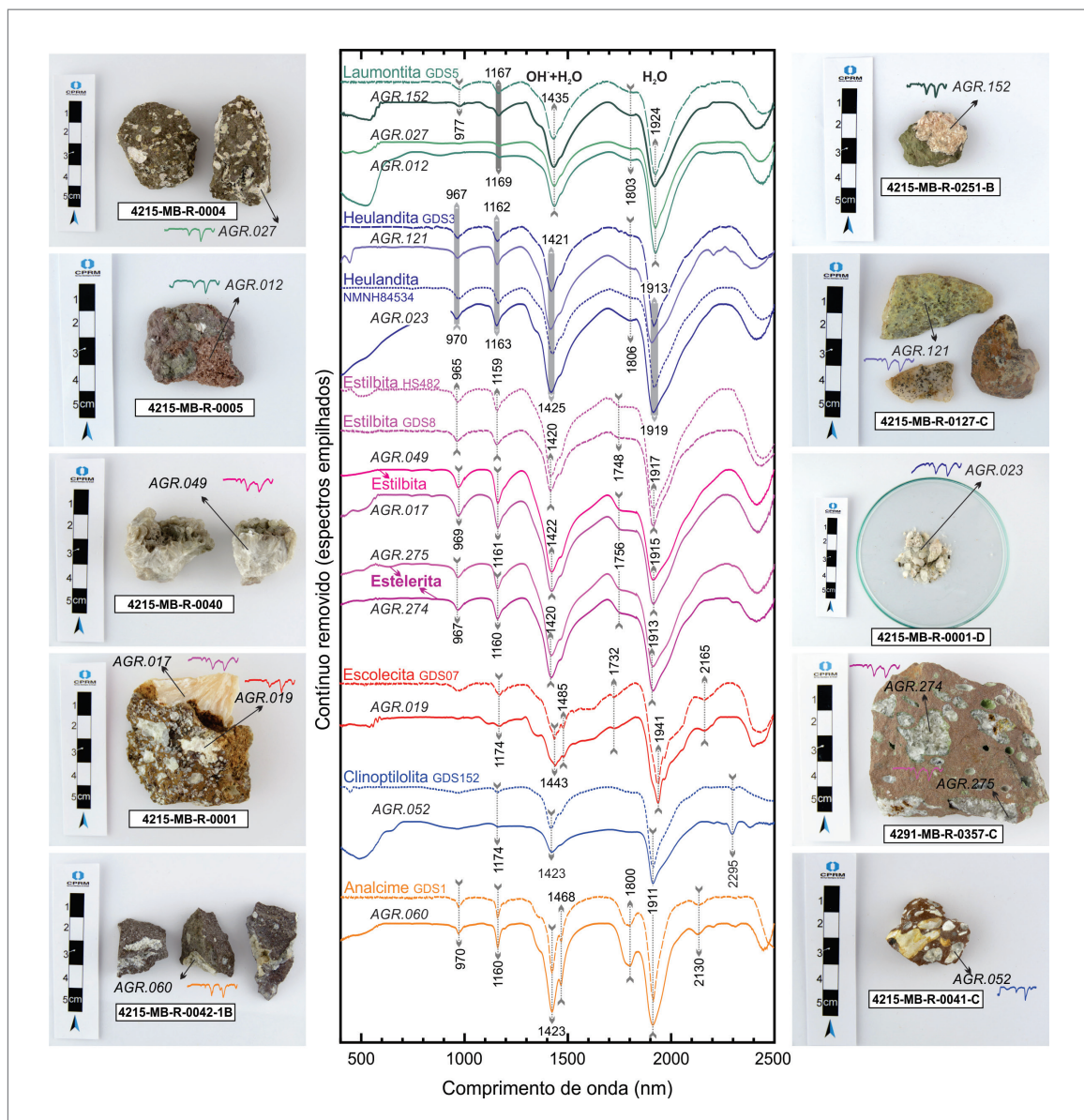
### 5.5.1.1. Feições Espectrais Diagnósticas das Zeólitas

Assinaturas espectrais de referência de minerais do grupo das zeólitas nas bibliotecas espectrais disponíveis para consulta são ainda escassas, destaca-se a biblioteca

do *United States Geological Survey - USGS* (KOKALY *et al.*, 2017), que contem assinaturas das seguintes fases minerais: analcima, chabasita, clinoptilolita, erionita, esolecita, estilbita, heulandita, laumontita, mesolita, mordenita e natrolita.

A partir das curvas espectrais obtidas nas amostras de zeólitas coletadas nos basaltos do Grupo Serra Geral e sua comparação por similaridade com as assinaturas de referência, foi possível a elaboração de uma biblioteca espectral de minerais específica para os jazimentos de zeólitas estudados (Figura 5.5).

Na figura, expõem-se os espectros mais representativos, selecionados conforme significativa correspondência



**Figura 5.5** - Biblioteca Espectral de zeólitas do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul. Gráficos de assinaturas espectrais representativas. Linhas contínuas correspondem aos espectros medidos neste estudo, linhas descontínuas correspondem aos espectros da Biblioteca Espectral de referência do USGS (KOKALY *et al.*, 2017), com seus respectivos códigos de amostra. Nas laterais, fotografias das amostras com flechas indicando a posição da análise. AGR(+II).+ três caracteres numéricos nas fotografias e gráficos indicam o código do espectro de laboratório.

com os equivalentes da biblioteca de referência, exceto pela assinatura da estelerita, ausente da biblioteca do USGS, mas cuja amostra analisada por espectroscopia de reflectância (ER) teve sua variedade identificada pelo hábito característico. Assim, devido à ausência de modelos comparativos para as diversas variedades de zeólitas e tendo-se em conta a grande quantidade de minerais deste grupo, nota-se que há ainda expressiva limitação na sua identificação por ER, além de, no geral, se deparar com curvas espectrais bastante semelhantes entre si, diferindo-se apenas por pequenas variações na posição e profundidade de feições de absorção, muitas vezes superpondo-se aos limites de variação observados dentro de um mesmo tipo. Como exceção a este padrão espectral homogêneo, menciona-se as zeólitas analcima, escolecita e natrolita, que possuem assinaturas muito particulares, que as distinguem facilmente das demais. Destas, neste estudo, foram identificadas escolecita e analcima (Figura 5.5).

Zeólitas, minerais aluminossilicatados hidratados, caracterizados por estruturas tridimensionais com diferentes arranjos dos tetraedros de SiO<sub>4</sub> e AlO<sub>4</sub>, distinguem-se entre si segundo esses arranjos espaciais e também pelo conteúdo de voláteis e cátions presentes (DEER *et al.*, 1963; BRECK, 1974). São diagnósticas e principais para a identificação do grupo das zeólitas as feições de absorção amplas, profundas, agudas e assimétricas posicionadas em aproximadamente 1400 nm e 1900 nm. Essas feições são tipicamente associadas às vibrações moleculares de estiramento e torção das ligações entre os átomos das moléculas de água presentes na estrutura mineral. A posição exata dessas feições, em termos de comprimento de onda, e sua profundidade, podem variar entre um espécime e outro (Tabela 5.2), principalmente, de acordo com os cátions presentes na fórmula mineral (e.g.: K, Na, Ca, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) (CLOUTIS *et al.*, 2002). O potencial para discriminação entre espécimes, baseado nessas feições, não é alto, mas, através delas é possível distinguir, por exemplo, laumontita e mesolita das demais zeólitas dentre as que têm assinaturas similares. É interessante notar a tendência de correlação positiva relativa ao aumento do comprimento de onda na posição dessas duas feições de absorção, como pode ser observado na Tabela 5.2, em que as zeólitas estão ordenadas conforme a feição de 1400 nm. Conforme observado por Cloutis *et al.* (2002), exceto para as zeólitas fibrosas segundo a classificação de Breck (1974), as feições de 1400 nm e 1900 nm se posicionam, no geral, em comprimentos de onda mais elevados nas composições mais cálcicas, enquanto comprimentos de onda menos elevados são característicos dos espécimes onde potássio e sódio predominam como cátions. No caso das zeólitas fibrosas, a feição de absorção em 1400 nm aumenta em comprimento de onda e diminui em

**Tabela 5.2** - Comprimento de onda em nanômetros das feições espectrais com potencial discriminatório das zeólitas da biblioteca de referência (KOKALY *et al.*, 2017) e de espécimes identificados neste estudo. Para as feições nas regiões de 1400 nm e 1900 nm, o incremento na posição é indicado pela sequência: fonte normal, fonte em itálico, fonte em negrito, e fonte em itálico e negrito. Para as feições em 970 nm e 1160 nm o incremento na profundidade das feições é indicado pela sequência: fonte normal, fonte em itálico, fonte em negrito, e fonte em itálico e negrito. <sup>(a)</sup> Zeólitas dos Grupos 1, 2, 4, 6 e 7, segundo classificação de Breck (1974), posição das feições extraídas das assinaturas da biblioteca do USGS (KOKALY *et al.*, 2017). <sup>(b)</sup> Posições das feições extraídas de espectros obtidos neste estudo. <sup>(c)</sup> Zeólitas do Grupo 5 ou zeólitas fibrosas, segundo classificação de Breck (1974), posição das feições extraídas das assinaturas da biblioteca do USGS (KOKALY *et al.*, 2017).

ZEÓLITA	FEIÇÃO DE ABSORÇÃO (NM)				
	~1400	~1900	~970	~1160	OUTRAS
Mordenita (a)	1419	1913-1914	968-985	1158	
Clinoptilolita (a)	1419-1420	1912-1914	973	1158-1160	1815, 2295
Clinoptilolita (b)	1421-1423	1912-1913	-	1159	2295
Estilbita (a)	1419-1422	1915-1917	<b>964-965</b>	<b>1159</b>	1748
Estilbita (b)	1422	1912-1915	<b>965-970</b>	<b>1161</b>	1756
Estelerita (a) (b)	1420	1913	<b>967</b>	<b>1160</b>	1756
Erionita (a)	1420-1421	1914-1916	967	1156-1159	2209
Erionita (b)	1422	1915	968	1158	2209
Chabasita (a)	1422	1922	968	<b>1152</b>	1764
Heulandita (a)	1422-1427	1918-1922	<b>967-971</b>	<b>1160-1165</b>	1806
Heulandita (b)	1421-1425	1919	<b>965</b>	<b>1157</b>	1806
Analcima (a)	1424	1914	<b>971</b>	<b>1162</b>	1468, 1805, 2135
Analcima (b)	1423	1911	<b>970</b>	<b>1160</b>	1468, 1800, 2130
Laumontita (a)	<b>1431</b>	<b>1925</b>	978	1165	1798
Laumontita (b)	<b>1435</b>	<b>1924</b>	977	1167	1803
Mesolita (c)	<b>1440</b>	<b>1937</b>	980	1166	1756
Escolecita (c)	<b>1441</b>	<b>1940</b>	979	1174	1485, 1730, 2165
Escolecita (b) (c)	<b>1443</b>	<b>1941</b>	-	1174	1485, 1730, 2165
Natrolita (c)	<b>1452-1454</b>	<b>1940-1943</b>	958-983	1150-1180	1605, 1772, 1815

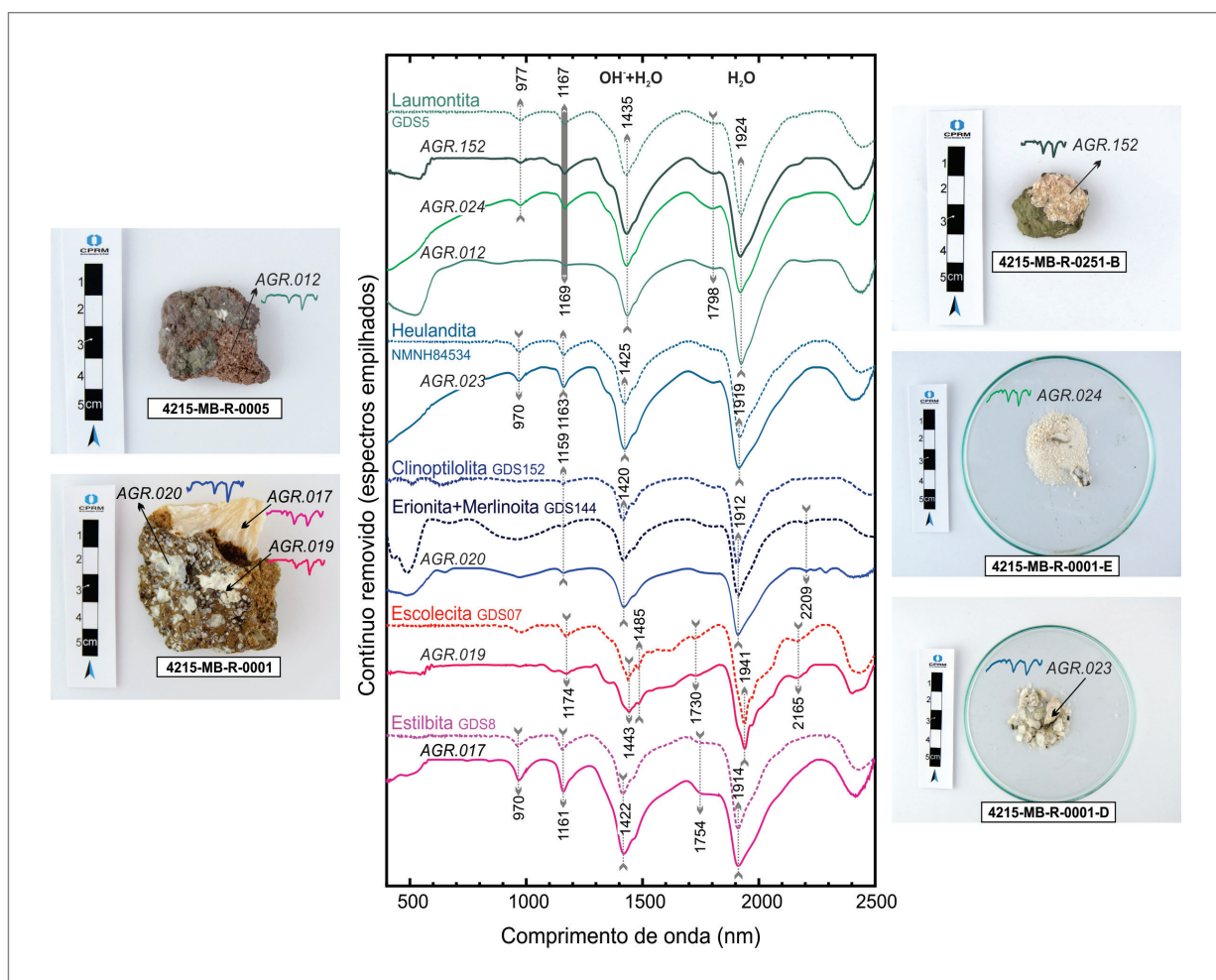
profundidade com o aumento no conteúdo em sódio, enquanto a feição em 1900 nm é menos profunda com o aumento no conteúdo em sódio.

Também significativas e com potencial para distinção entre as variedades de zeólitas são as feições posicionadas em comprimentos de onda em aproximadamente 970 nm e 1160 nm (Tabela 5.2). Além de variações na própria posição da feição, são diagnósticas as variações na profundidade das mesmas, sendo bastante importantes para a discriminação de estilbita e heulandita das demais. Outras feições relevantes na discriminação entre esses minerais também estão indicadas na Tabela 5.2. Nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7, e 5.8 se observam graficamente as assinaturas espectrais com as indicações da posição das feições de absorção significativas. Dessa forma, observa-se que, apesar de fortes semelhanças entre a maioria dos espectros de zeólitas, variações mais e menos sutis entre eles podem ser encontradas, indicando um potencial significativo da técnica analítica da espectroscopia

de reflectância na discriminação entre minerais deste grupo. Em que pese a possibilidade de misturas minerais, nota-se que as maiores possibilidades de incertezas, na identificação por meio desta técnica, estão nos conjuntos: erionita/clinoptilolita/mordenita e heulandita/estilbita.

### 5.5.1.2. Resultados - Identificação Mineral

A Tabela 5.3 resume os resultados de identificação mineral pelo método analítico da ER nas amostras dos jazimentos e ocorrências de zeólitas mais significativos dos diversos domínios de exposição das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul. Nesta síntese, dada a inadequação da variedade erionita para uso agrônômico destacou-se em negrito as amostras em que a mesma foi identificada ou não pôde ser descartada. A Tabela 5.3 traz também, a título de comparação, os resultados obtidos por meio de análises de difração de raios X (DRX), para as amostras que contaram com

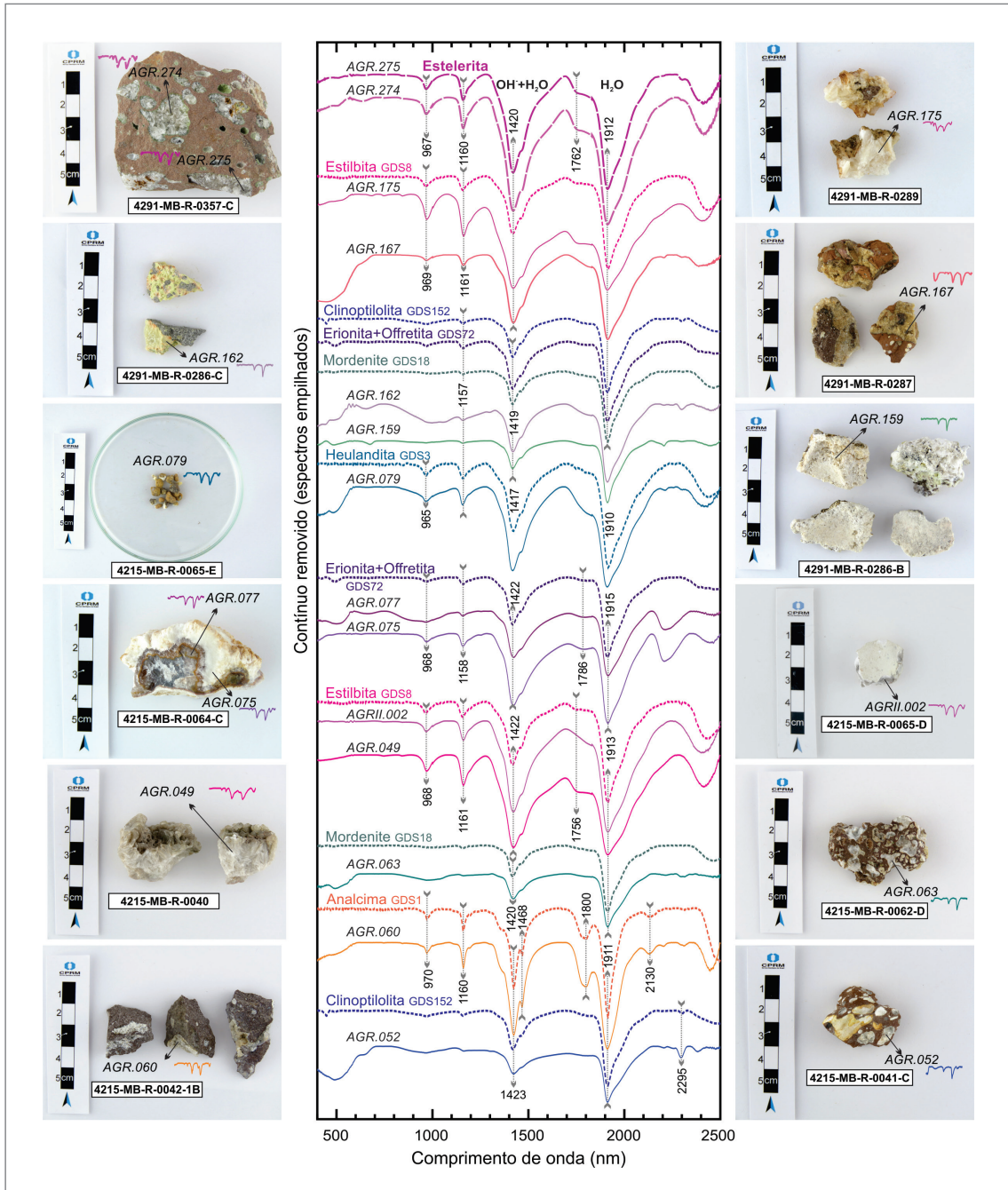


**Figura 5.6** - Gráficos de assinaturas espectrais de zeólitas do Grupo Serra Geral, domínios: 1- Litoral Norte e 2 - Região Metropolitana de Porto Alegre. Linhas contínuas correspondem aos espectros medidos neste estudo, linhas descontínuas correspondem aos espectros da Biblioteca Espectral de referência do USGS (KOKALY *et al.*, 2017) com seus respectivos códigos de amostra. Nas laterais, fotografias das amostras com flechas indicando a posição da análise. AGR.+ três caracteres numéricos nas fotografias e gráficos indicam o código do espectro de laboratório.

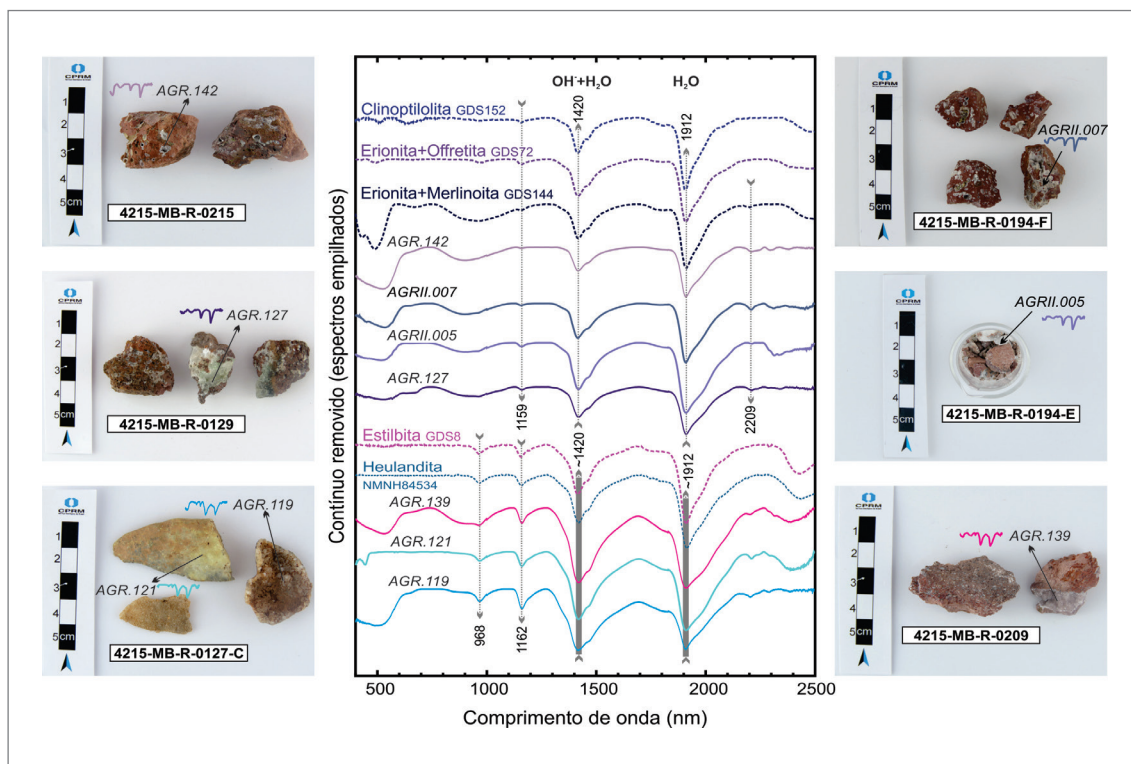
estas análises adicionais, e foram destacados, também em negrito, os espécimes em que a identificação foi coincidente em ambos os métodos analíticos.

Nas Figuras 5.6, 5.7, e 5.8 são apresentadas, graficamente, as assinaturas espectrais representativas do conteúdo mineral de jazimentos de zeólitas selecionados de cada domínio. Dos domínios 1 (litoral norte do Rio Grande do Sul) e 2 (Região Metropolitana de Porto Alegre) (Figura 5.6) foram poucas as amostras analisadas.

Os espectros obtidos indicaram apenas laumontita no domínio 1 e a presença de estilbita, escolecita, heulandita, laumontita e a possibilidade de clinoptilolita ou erionita num espectro inconclusivo no domínio 2 (amostra 4215-MB-R-0001, espectro de código Agr.020 - Figura 5.6). É interessante notar a identificação de pelo menos três variedades de zeólitas distintas nessa mesma amostra e que elas puderam ser discriminadas perfeitamente pela análise espectroscópica, mesmo considerando a possibilidade



**Figura 5.7** - Gráficos de assinaturas espectrais de amostras de zeólitas do Grupo Serra Geral, domínio 3 - Central. Linhas contínuas correspondem aos espectros medidos neste estudo, linhas descontínuas correspondem aos espectros da Biblioteca Espectral de referência do USGS (KOKALY *et al.*, 2017), com seus respectivos códigos de amostra. Nas laterais, fotografias das amostras com flechas indicando a posição da análise. AGR(+II).+ três caracteres numéricos nas fotografias e gráficos indicam o código do espectro de laboratório.



**Figura 5.8** - Gráficos de assinaturas espectrais de amostras de zeólitas do Grupo Serra Geral, domínio 4 – Fronteira Oeste. Linhas contínuas correspondem aos espectros medidos neste estudo, linhas descontínuas correspondem aos espectros da Biblioteca Espectral de referência do USGS (KOKALY *et al.*, 2017), com seus respectivos códigos de amostra. Nas laterais, fotografias das amostras com flechas indicando a posição da análise. AGR(+II).+ três caracteres numéricos nas fotografias e gráficos indicam o código do espectro de laboratório.

**Tabela 5.3** - Sumário do conteúdo mineral identificado pelo método da espectroscopia de reflectância (ER) em amostras selecionadas de zeólitas dos diversos domínios de exposição do Grupo Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul e comparação com resultados analíticos pelo método da difração de raios X (DRX). Domínios: (1) Litoral Norte, (2) Região Metropolitana de Porto Alegre, (3) Central (4) Fronteira Oeste (ver mapa na Figura 5.1). Amostras ressaltadas em negrito indicam possível presença de erionita. Minerais em negrito indicam coincidência entre os resultados da ER e DRX.

DOMÍNIO	AMOSTRA	ZEÓLITAS IDENTIFICADAS	ZEÓLITAS POSSÍVEIS	RESULTADO DRX
1	4215-MB-R-0005	<b>Laumontita</b>		<b>Laumontita</b>
1	4215-MB-R-0251-B	Laumontita		
2	<b>4215-MB-R-0001</b>	Estilbita, Escolécita	Erionita, Clinoptilolita	
2	4215-MB-R-0001-B	Estilbita		
2	4215-MB-R-0001-D	<b>Heulandita</b>		<b>Heulandita</b>
2	4215-MB-R-0001-E	<b>Laumontita</b>		<b>Laumontita</b>
3	4291-MB-R-0026-B	Estilbita	<b>Heulandita</b>	<b>Heulandita</b>
3	4291-MB-R-0040	<b>Estilbita</b>		<b>Estilbita</b>
3	4215-MB-R-0041-C	Clinoptilolita		Heulandita
3	4215-MB-R-0042-1B	Analcima		
3	4215-MB-R-0062-D	Mordenita		
3	<b>4215-MB-R-0064-C</b>	Erionita		Heulandita
3	4215-MB-R-0065-D	Estilbita		
3	4215-MB-R-0065-E	<b>Heulandita</b>		<b>Heulandita</b>

continua

**Tabela 5.3** - Sumário do conteúdo mineral identificado pelo método da espectroscopia de reflectância (ER) em amostras selecionadas de zeólitas dos diversos domínios de exposição do Grupo Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul e comparação com resultados analíticos pelo método da difração de raios X (DRX). Domínios: (1) Litoral Norte, (2) Região Metropolitana de Porto Alegre, (3) Central (4) Fronteira Oeste (ver mapa na Figura 5.1). Amostras ressaltadas em negrito indicam possível presença de erionita. Minerais em negrito indicam coincidência entre os resultados da ER e DRX. (continuação)

DOMÍNIO	AMOSTRA	ZEÓLITAS IDENTIFICADAS	ZEÓLITAS POSSÍVEIS	RESULTADO DRX
3	4215-MB-R-0071-A	Heulandita		
3	4215-MB-R-0076	Estilbita		
3	4215-MB-R-0095-2B	Estilbita		
3	<b>4291-MB-R-0286-B</b>	Mordenita	Erionita, Clinoptilolita	Heulandita
3	4291-MB-R-0286-C		Mordenita, Erionita, Clinoptilolita	
3	4291-MB-R-0287	Estilbita		
3	4291-MB-R-0289	Estilbita		
3	4291-MB-R-0292	Estilbita		
3	4291-MB-R-0357-C	Estelerita		
4	4215-MB-R-0127-C	<b>Heulandita</b>	Estilbita	<b>Heulandita</b>
4	<b>4215-MB-R-0129</b>		Erionita, Clinoptilolita	Heulandita
4	<b>4215-MB-R-0129-A</b>		Erionita, Clinoptilolita	
4	<b>4215-MB-R-0129-B</b>		Erionita, Clinoptilolita	
4	<b>4215-MB-R-0194-F</b>		Erionita, Clinoptilolita	
4	4215-MB-R-0209	Estilbita	Heulandita	
4	<b>4215-MB-R-0215</b>		Erionita, Clinoptilolita	

de obtenção de espectros mistos, dados os 10 mm da dimensão do foco de medição da sonda de contato.

No Domínio Central (Figura 5.7), que contou com número significativo de amostras analisadas, foram reconhecidas as seguintes variedades de zeólitas: analcima, clinoptilolita, estelerita, estilbita, heulandita e mordenita. Na amostra 4215-MB-R-0064-C (espectros de códigos AGR.075 e AGR.077 – Figura 5.7), as assinaturas espectrais obtidas são coincidentes com uma assinatura espectral de erionita da biblioteca espectral de referência (KOKALY *et al*, 2017). Em duas outras amostras os espectros são inconclusivos, de forma que não se pode descartar a possibilidade da presença desta fase mineral: amostras 4215-MB-R-0286-B (espectro AGR.159) e 4215-MB-R-0286-C (espectro AGR.162), também apresentadas na Figura 5.7.

Nesses casos, as alternativas seriam mordenita ou clinoptilolita, respectivamente.

No domínio Fronteira Oeste, as análises espectrais (Figura 5.8) foram capazes de identificar estilbita e heulandita, além da possibilidade de erionita, em espectros inconclusivos nas amostras 4215-MB-R-0129, 4215-MB-R-0194-E, 4215-MB-R-0194-F, 4215-MB-R-0215, mas em todos poderia se tratar de clinoptilolita.

### 5.5.1.3. Discussão e Conclusão

Apesar da relativa complexidade no reconhecimento das variedades de zeólitas devido às semelhanças espectrais entre a maioria delas e à escassez de espectros nas bibliotecas espectrais de referência, a espectroscopia de reflectância se mostrou um método analítico com bom potencial discriminatório de fases minerais deste grupo, fornecendo dados complementares relevantes aos métodos mais tradicionais de análise, com as vantagens de ser rápido, não destrutivo e demandar pouca ou nenhuma preparação das amostras, o que permite a obtenção de um grande número de assinaturas espectrais num curto intervalo de tempo. Uma contribuição importante do presente estudo foi a elaboração de uma biblioteca espectral de minerais do grupo das zeólitas, com algumas dezenas de assinaturas que ficarão disponíveis para constituir referência para outros estudos de jazimentos desses minerais.

A biblioteca inclui assinaturas da variedade estelerita, ainda não cadastrada em outras bibliotecas espectrais disponíveis para consulta. A comparação com os resultados obtidos pelas análises de difração de raios X (Tabela 5.3) mostra uma boa correspondência de

resultados, em que pesem as incertezas inerentes a ambos os métodos no reconhecimento dos minerais de zeólitas. Como em algumas situações a identificação por ER nos pareceu inequívoca, dado ao alto grau de similaridade com espécimes da biblioteca espectral de referência e, considerando-se a tradição e confiabilidade das bibliotecas de referência de DRX, não se pode descartar a hipótese de algum problema na amostragem, como, por exemplo, no caso da amostra 4215-MB-R-0041-C, em que clinoptilolita foi identificada por ER e heulandita por DRX. Finalmente, vale ressaltar que com a inserção constante de novos espectros nas bibliotecas de referência e por se tratar de um método analítico muito rápido, a ER mostra-se como um método eficiente para um rápido reconhecimento mineral, principalmente, considerando-se projetos exploratórios, onde as tomadas de decisão precisam ser céleres.

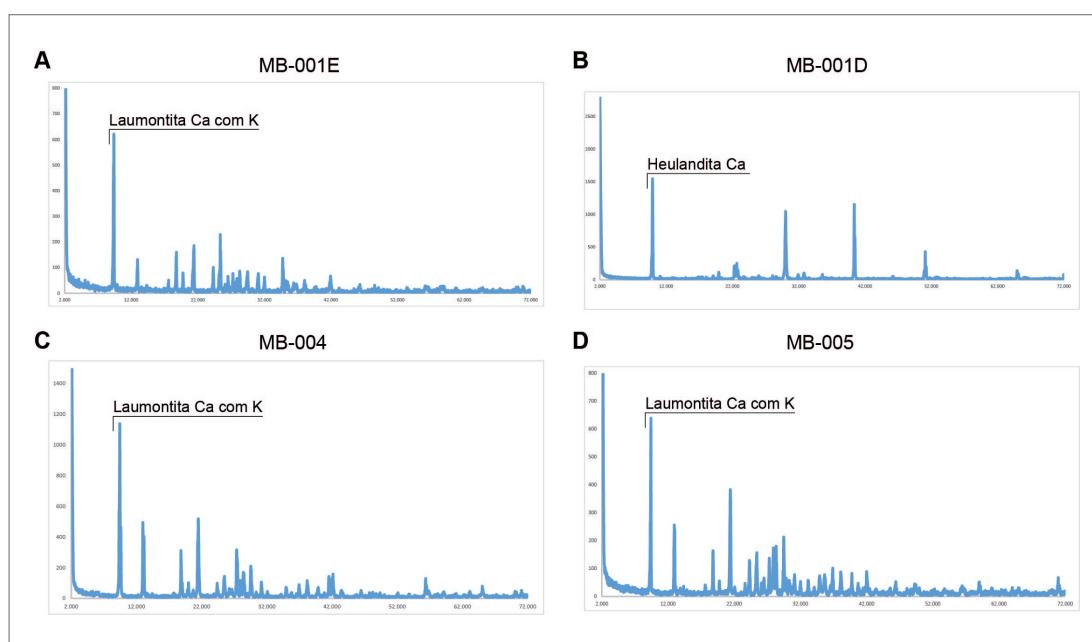
### 5.5.2. Difratometria de Raios X

A análise qualitativa e semiquantitativa efetuada pelo Laboratório de Raios X do IG-UFRGS resultou em 20 difratogramas obtidos pelo método do pó em rocha total e zeólitas em fases "puras" (heulandita, laumontita, estilbita, mordenita), e minerais associados (quartzo, calcita), com ou sem minerais essenciais dos basaltos e dacitos (ex. plagioclásio labradorita), e argilominerais (esmectita, celadonita).

Os difratogramas correspondem às amostras de número MB-R-001-D e MB-R-001-E (Região

Metropolitana de Porto Alegre); MB-R-003, MB-R-004, MB-R-005 e MB-R-252B (Domínio Litoral Norte); MB-R-012-B (Região Norte), MB-R-026-B, MB-R-040, MB-R-041-C1, MB-R-041-C2, MB-R-063-E, MB-R-064-C, MB-R-065-E, MB-R-286-B e MB-R-286-D; (Domínio Central); MB-R-127, MB-R-129-A, MB-R-182 e MB-R-194B (Domínio Fronteira Oeste). As amostras do Domínio Região Metropolitana evidenciam a ocorrência de heulandita cálcica pura e laumontita (Figuras 5.9 A e B), enquanto as amostras de zeólitas do Domínio Litoral Norte indicam o amplo predomínio de laumontita cálcica com potássio (Figuras 5.9 C e D). Dentre os argilominerais identificados em difratogramas, no Bloco Litoral foi analisada uma argila de perfil intempérico sobre dacitos vítreos (amostra MB-R-003), obtendo-se como resultado a identificação de montmorilonita de composição magnésiana (19%) e celadonita (16%), além dos picos de feldspato potássico, albita e quartzo (Figura 5.10A). Na região norte, na localidade de Getúlio Vargas, no Distrito Mineiro de Ametista do Sul, foi obtida amostra de argilomineral de cor verde associado à mineralização de ametista em lavra garimpeira desativada, em basalto da Formação Paranapanema. A amostra se revelou uma mistura de 76% de celadonita e 23% de montmorilonita ferro-magnésiana (Figura 5.10B).

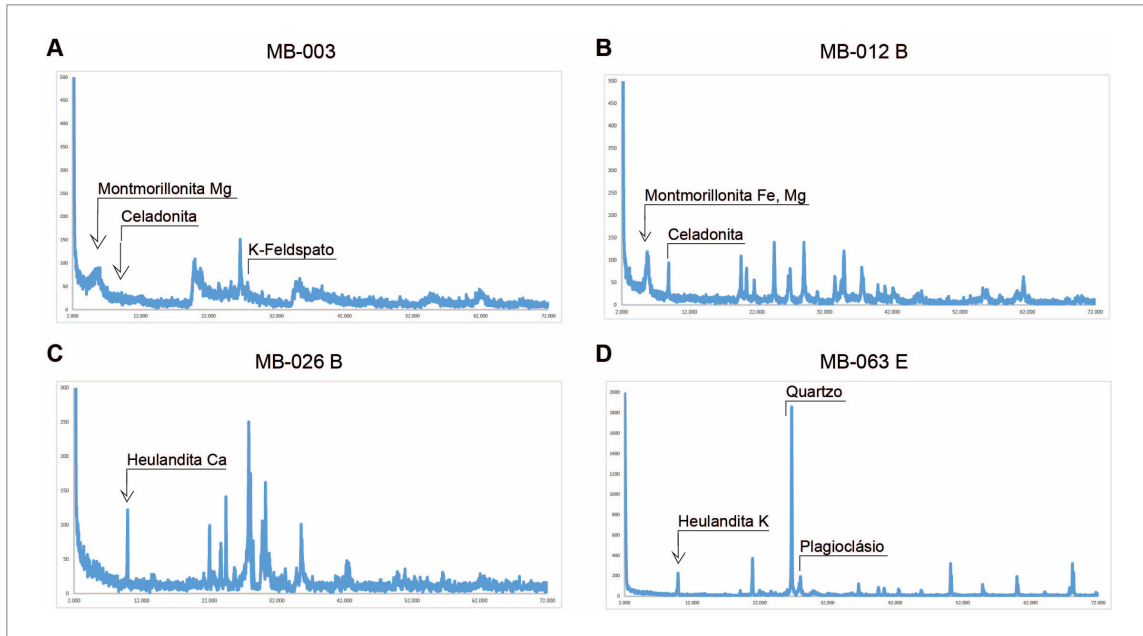
No Domínio Central foi investigado um basalto em processo de zeolitização, proveniente de lobo da Formação Torres que aflora no perfil Itaara-Santa Maria, na estrada do Perau (Figura 5.10C). O difratograma aponta heulandita cálcica na proporção de 85,7%,



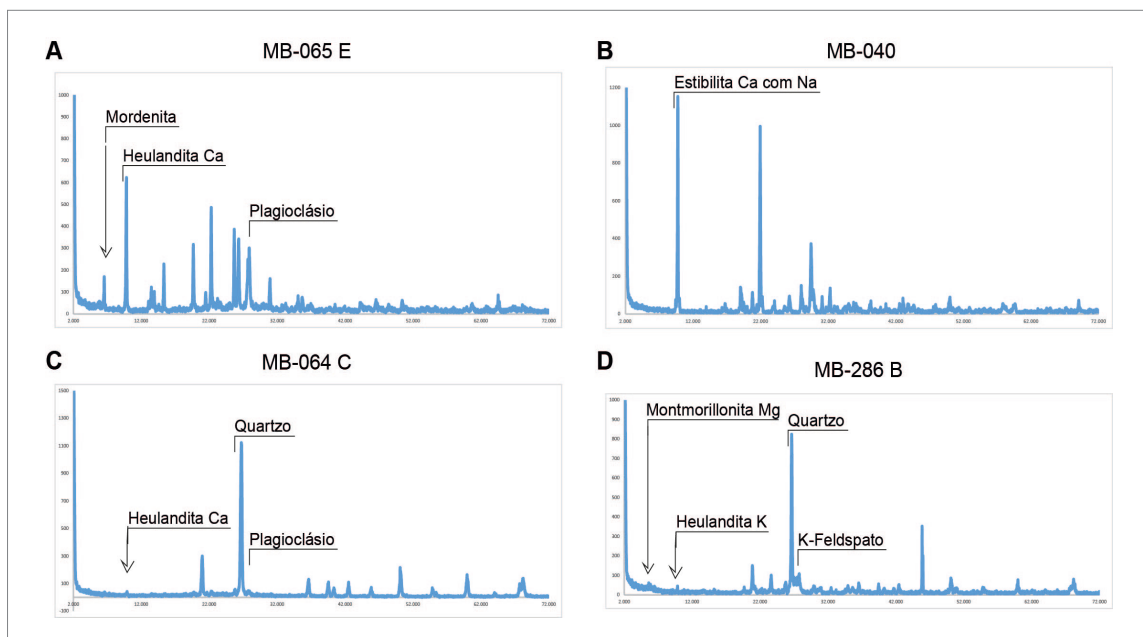
**Figura 5.9** - Difratomogramas com assinaturas de zeólitas de basaltos amigdaloides da Formação Torres nos domínios Região Metropolitana e Litoral. (A) e (B) Picos de heulandita pura e laumontita em lobos da Pedreira Ramish-Morro Reuter. (C) e (D) Picos de laumontita cálcica com potássio, em arenito zeolitizado de afloramento na Rota do Sol-RSC 453 (Tenda do Gordo) e de zeólitas separadas de cavidades de basaltos amigdaloides da Pedreira Itati, Bloco Litoral.

além do plagioclásio labradorita (14,3%). Em arenito zeolitizado (Figura 5.3E), coletado no perfil Vale do Sol-Herveiras, no ponto MB-063 foi identificado o pico de heulandita, além de quartzo e plagioclásio (Figura

5.10D). A heulandita cálcica é a zeólita predominante nos difratogramas de basaltos amigdaloides de lobos “S” do Bloco Central, por vezes com a zeólita fibrosa mordenita subordinada (Figura 5.11A). Em brecha associada



**Figura 5.10** - Difratogramas com assinaturas de argilominerais e zeólitas. (A) Argila de perfil residual sobre vidros dacíticos na Rota do Sol, próximo a Tainhas, com picos de montmorilonita magnésiana e celadonita, além de minerais residuais. (B) Picos de celadonita e montmorilonita ferro-magnésiana em amostra de argilomineral associado à ocorrência de ametista. Localidade de Getúlio Vargas, Região Norte. (C) Picos de heulandita cálcica e plagioclásio labradorita em basalto zeolitizado da Formação Torres. Perfil Itaara-Santa Maria, estrada do Perau. (D) Heulandita formada pela zeolitização de arenito intertrápico que capeia lobo da Formação Torres. Perfil Vale do Sol-Herveiras.



**Figura 5.11** - (A) Heulandita cálcica e mordenita reconhecidas em lobos “S” da Formação Torres, no perfil Vale do Sol-Herveiras. (B) Pico de estibilita cálcica em brechas encaixantes de domo andesítico. Pedreira Ouro Preto, Santa Cruz do Sul. (C) Assinatura de heulandita cálcica em amostra de zeólita fibrosa de cavidade de basalto amigdalóide. Formação Torres. Perfil Vale do Sol-Herveiras. (D) Zeólita de hábito fibroso em geodo de derrame dacítico, reconhecida como heulandita potássica. Perfil Bento Gonçalves-Monte Belo, ponto MB-286.



a domo andesítico na Pedreira Ouro Preto (Figura 5.3A) foi reconhecido o pico difratométrico da zeólita estilbita da variedade cálcica com sódio (Figura 5.11B).

Em várias amostras de zeólitas de hábito fibroso, onde a espectrorradiometria determina ou sugere a presença de erionita, como em lobos da Formação Torres no ponto MB-64, amostra “C”; ou em cavidade do tipo geodo em dacito no Perfil Monte Belo-Bento Gonçalves, no ponto MB-286, ambos no Bloco Central, a zeólita identificada pela difratometria é a heulandita potássica (Figura 5.11C e D). O fato evidencia ainda que as zeólitas fibrosas, que podem ser tomadas corriqueiramente em campo pela variedade mordenita necessitam de validação para seu reconhecimento. Da mesma maneira, no Bloco Fronteira Oeste, em amostras provenientes de brechas de crosta superior, coletadas nos derrames rubbly-pahoehoe D6 (ponto MB-129) e D7 (MB-194), zeólitas fibrosas, que forneceram leituras de curvas sugestivas de erionita na espectrorradiometria, mostram picos de heulandita cálcica com potássio e sódio, além de calcita nos difratogramas (Figura 5.12A e B). Por fim, neste último bloco, uma amostra de minerais de preenchimento de cavidades e de cimento em crosta separada de brecha de topo do derrame portador de geodos D5 (ponto MB-127), mostra heulandita cálcica, com potássio, sódio e estrôncio, além de calcita, enquanto que amostra de brecha do topo do derrame D6 (ponto MB-182) revela picos de heulandita potássica e calcita.

## 5.6. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO

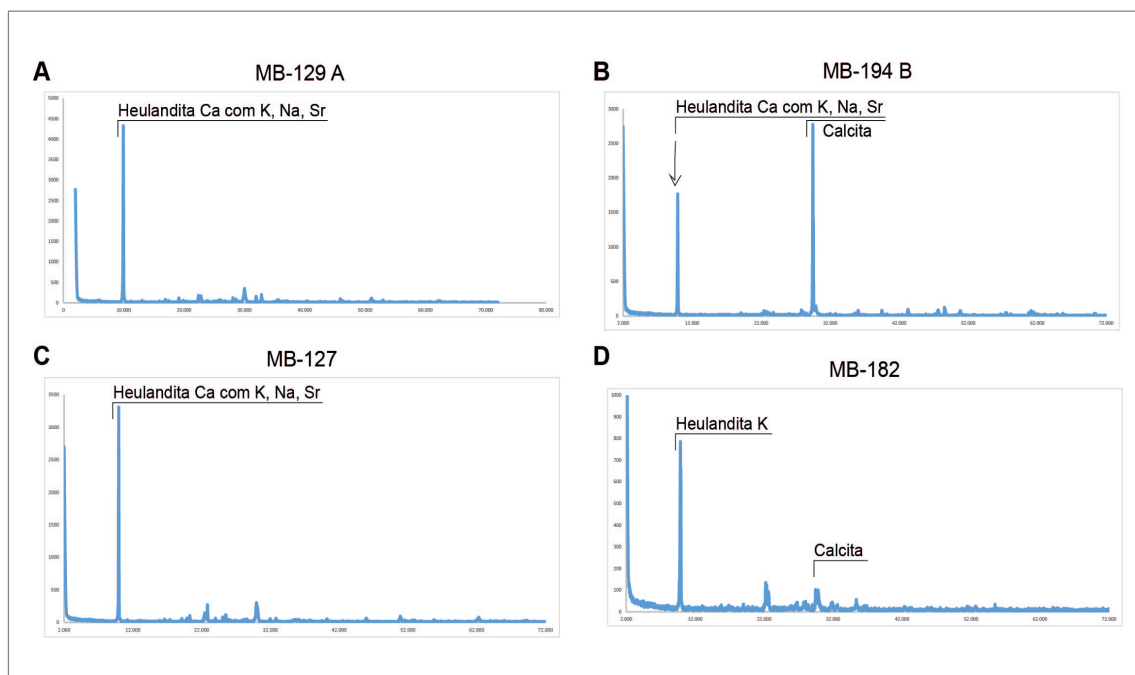
Durante os trabalhos de campo, empregou-se o método de quantificação por cartas de percentual. Para validação do procedimento, algumas amostras foram selecionadas e tratadas por classificação de imagens, com passos descritos a seguir.

### 5.6.1. Cuidados na Tomada das Fotos para Classificação de Imagens

Fotografias convencionais são imagens com baixa resolução espectral, apresentando informação restrita à faixa do espectro eletromagnético correspondente à região dos comprimentos de luz visíveis a olho nu. Esse fato constitui uma limitação importante na realização do processo de classificação desse tipo imagem.

Para que o processo de classificação de uma fotografia convencional tenha maiores chances de sucesso é necessário que alguns cuidados sejam observados no ato de tomada da imagem:

1. A lente da máquina fotográfica que fará a captura da imagem deve estar posicionada em sentido perpendicular à superfície do alvo;
2. A iluminação deve ser o mais uniforme possível, evitando a formação de áreas com superexposição ou subexposição a luz. Essas condições podem ser obtidas, em parte, através do controle do tempo de



**Figura 5.12** - Bloco Fronteira Oeste. (A) e (B) Zeólita e calcita separadas de cimento de brechas de topo dos derrames D6 (ponto MB-129) e D7 (MB-194), mostrando picos de heulandita cálcica com potássio e sódio, além de calcita. (C) Difratograma de minerais de amígdalas e de cimento de brecha de topo do derrame D5 (ponto MB-127), com picos de calcita e de heulandita cálcica com potássio, sódio e estrôncio. (D) Assinaturas de heulandita potássica e calcita em brecha de topo do derrame D6 (ponto MB-182).

exposição da cena e, também, através da tomada de mais uma imagem da mesma área;

3. Os elementos utilizados como escala gráfica, no ato da tomada da fotografia, devem possuir coloração bem diferente das superfícies presentes na imagem. Isso evita que partes da escala sejam confundidas com os alvos que se deseja classificar;

4. O relevo da área-alvo da fotografia deve ser o mais uniforme possível;

5. É importante que a imagem não esteja desfocada ou tremida. Isso pode ser parcialmente controlado através do uso de um tripé e ao observar-se a profundidade de campo no ato da tomada da fotografia;

6. O sensor da máquina fotográfica deve apresentar características condizentes com a resolução necessária para identificar as áreas-alvo na fotografia.

### 5.6.2. Classificação de Imagens

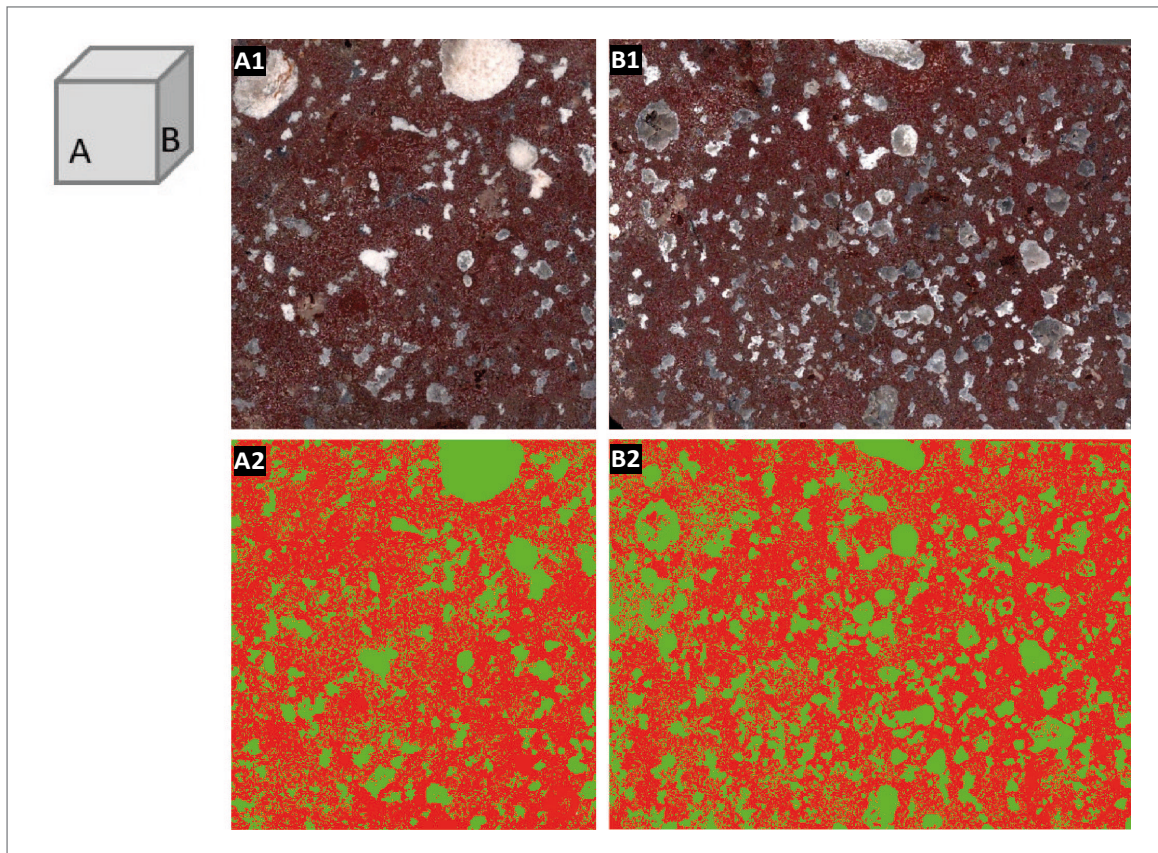
Na classificação das imagens, foi utilizado o software ENVI 5.5. O método empregado foi o Isodata, de classificação não supervisionada, ou seja, sem interferência do operador, exceto para avaliar a coerência da classificação.

Foram definidas duas classes, estéril e zeólita ou calcita (de acordo com o mineral-alvo). Os demais parâmetros de classificação não foram alterados. Devido à presença de pixels saturados (saturação de áreas claras da imagem), áreas de sombra e presença de artefatos, que dificultariam a classificação, algumas fotos foram recortadas.

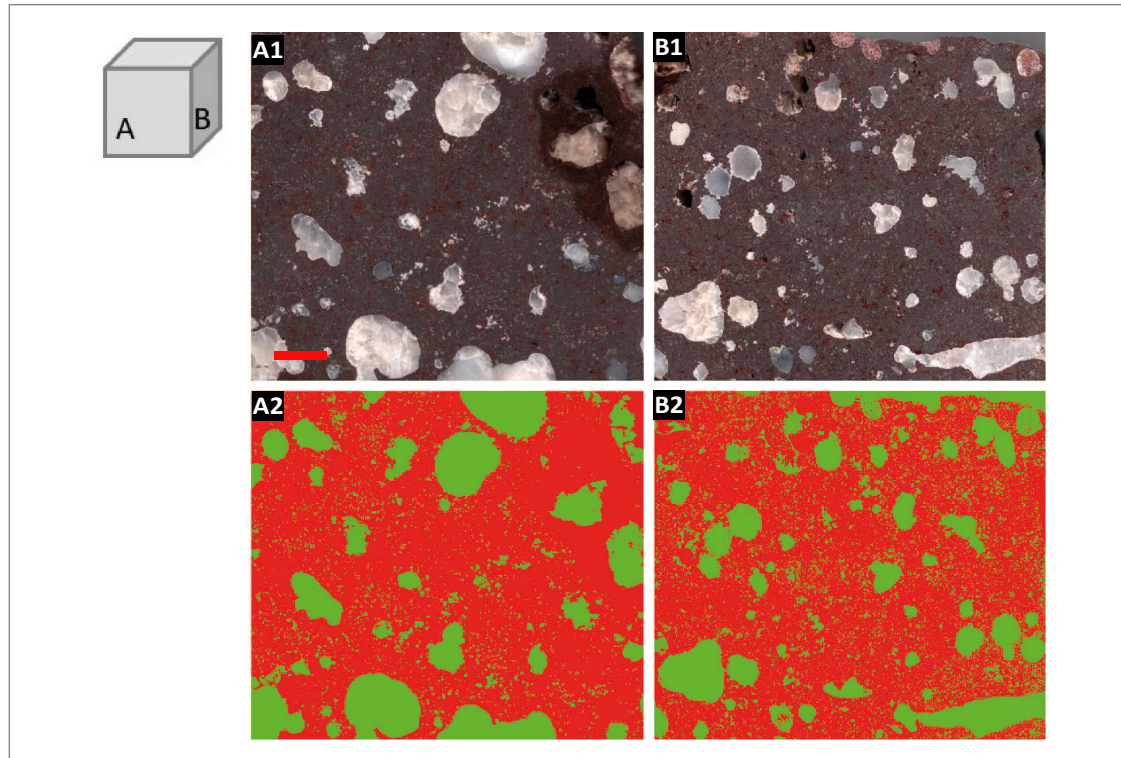
Os resultados são apresentados pelo software em número de pixels e em percentual, e se assemelham aos resultados obtidos em campo com uso de tabelas de estimativa de percentual (Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15).

### 5.7. POSSIBILIDADES DO USO DE ZEÓLITAS DO GRUPO SERRA GERAL NA AGRICULTURA

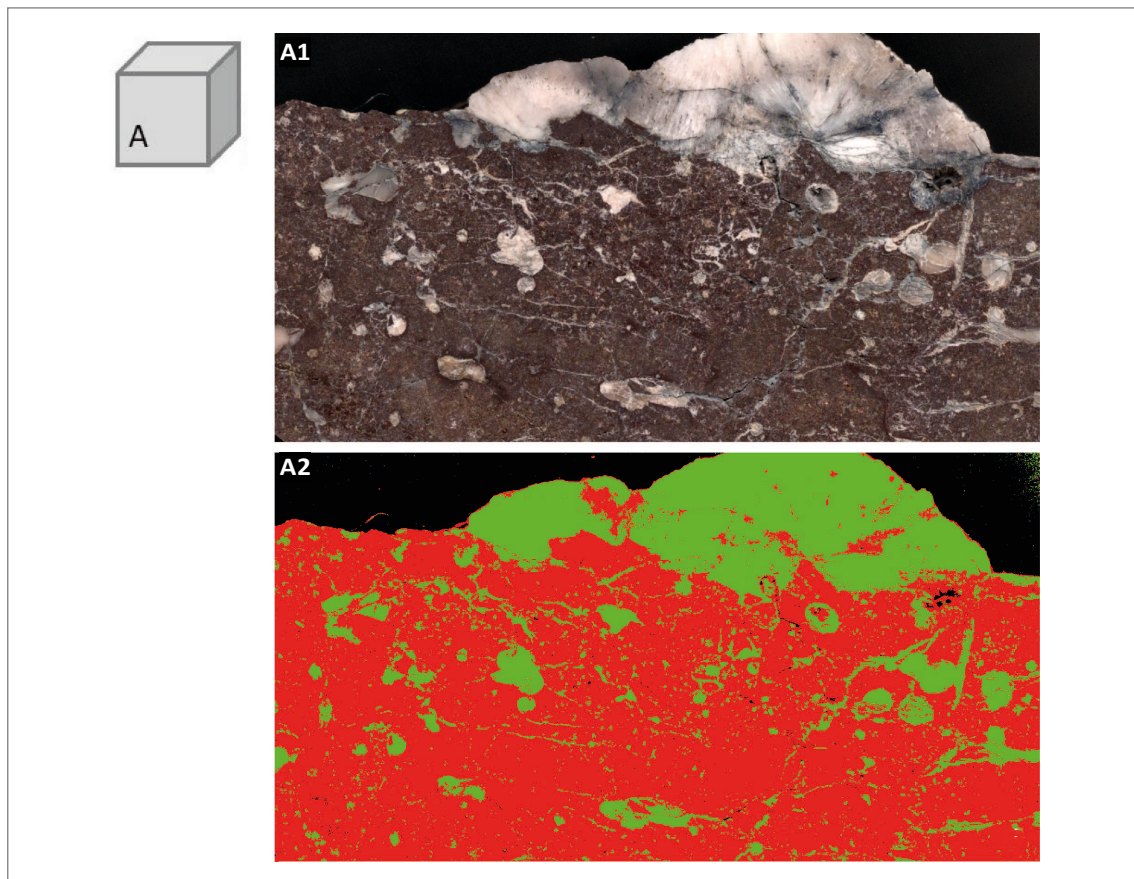
Como as zeólitas se comportam como sorventes de moléculas nutrientes vegetais (compostos de nitrogênio, altamente voláteis, cátions como K, Ca e Mg, além de água), seu emprego na agricultura dá-se nas formas de mistura com fertilizantes, substratos enriquecidos ou como condicionador de solos, incrementando a capacidade de retenção destes compostos no solo e mediando sua distribuição às plantas.



**Figura 5.13** - (A1 e B1) Fotografia em cubo cortado e polido a partir da amostra 4215-MB-R-001-C, mostrando cavidades arredondadas a parcialmente alongadas e completamente preenchidas por zeólitas (escala 1 cm) (A2 e B2). Imagem da amostra, resultante da aplicação de algoritmo de classificação não supervisionado, executada no software ENVI 5.5, mostrando percentuais de áreas, Face A - matriz 67,39% (em vermelho); zeólita 32,61% (em verde); Face B - matriz 65,84 (em vermelho); zeólita 34,16% (em verde).



**Figura 5.14** - Fotografia em cubo cortado e polido a partir da amostra 4215-MB-R-063, mostrando cavidades arredondadas a irregulares. Face A - matriz 74,54% (em vermelho); zeólita 25,46% (em verde); Face B - matriz - 73,06% (em vermelho); zeólita 26,94% (em verde)



**Figura 5.15** - Fotografia em face cortada e polida da amostra 4215-MB-R-001 – matriz 66,2 (em vermelho); zeólita 24,1 (em verde); não classificado 9,7. Resultado, na parte classificada, matriz – 73,30 e zeólita – 26,70.

Segundo Van Straaten (2007), os principais usos das zeólitas na agricultura estão ligados à retenção, liberação lenta e trocas de amônia ( $\text{NH}_4^+$ ), presente em esterco, e, também, consorciadas ao uso de fertilizantes à base de ureia, nitrato de amônio ou de K, em proporções que variam de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  a  $1 \text{ t ha}^{-1}$ . Como a capacidade de retenção de compostos e cátions está ligada ao arranjo cristalográfico, à dimensão dos poros e à CTC (capacidade de troca catiônica) das diversas fases minerais, os compostos ou cátions são admitidos de acordo com a compatibilidade de seu raio iônico hidratado.

Na Tabela 5.4, modificada de Bandeira *et al.* (2013), são apresentados os principais cátions trocáveis e a compatibilidade do raio iônico hidratado de vários cátions e compostos de interesse agrônômico com as principais variedades de zeólitas dos basaltos amigdaloides descritos.

Fica evidente a seletividade específica para os compostos nitrogenados da maior parte das variedades de zeólitas descritas no Grupo Serra Geral.

A proposta de uso agrônômico considera o emprego integral dos basaltos amigdaloides na forma de pó de rocha, pois, além das cavidades, a matriz dos basaltos é rica em produtos de desvitrificação, como esmectitas, que promovem incremento da capacidade de trocas

catiônicas (CTC) dos solos, além de minerais que aportam macro e micronutrientes, como Ca, Mg, Cu, Zn e Mn. Onze amostras de basaltos amigdaloides a zeólitas foram caracterizadas quimicamente para averiguar teores de nutrientes, micronutrientes e possíveis contaminantes como elementos potencialmente tóxicos (EPT), ver Tabela 5.5.

Deve-se observar que a reprodutibilidade dos resultados deste tipo de amostra pode ser afetada por quantidades maiores ou menores de diferentes espécies zeólitas e de outros minerais que preenchem as cavidades, como também pela proporção cavidades matriz. Três das amostras não preencheram os requisitos da IN MAPA 05/2016 quanto à soma de bases e outras quatro mostraram teores de  $\text{K}_2\text{O}$  inferior a 1%.

Uma das amostras (MB-040 B) corresponde à zeolita catada (estilbita) em crostas das brechas de contato do corpo intrusivo de rochas andesíticas da Lavra Ouro Preto, enquanto a amostra MB-040 C representa o basalto amigdaloides em clastos da mesma brecha (ver capítulo 4, item 4.2.2.1). Os teores de EPT atendem à norma e os teores de Cr e Ni não apresentam valores expressivos.

Também foram analisadas sete amostras de brechas de zona superior de derrames de morfologia *rubbly*

**Tabela 5.4** - Zeólitas mais comuns nos basaltos amigdaloides do Rio Grande do Sul, com composição química, principais cátions trocáveis e sua compatibilidade com o raio iônico hidratado de vários cátions e compostos de interesse agrônômico. Modificado de Bandeira *et al.* (2013).

ZEÓLITA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	PRINCIPAIS CÁTIONS TROCÁVEIS	TAMANHO DO RAIO DOS POROS	CTC (MEQ/G)	MOLÉCULAS E CÁTIONS COMPATÍVEIS RIH
Heulandita	$(\text{Ca}_{0,5}, \text{Sr}_{0,5}, \text{Ba}_{0,5}, \text{Mg}_{0,5}, \text{Na}, \text{K})_9[\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}]\cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Ca, Na, K	3,1 x 7,5 Å 3,6 x 4,6 Å 2,8 x 4,7 Å	2,91	$\text{K}^+$ (2,01 Å) $\text{Ca}^{+2}$ (4,12 Å) $\text{NH}_4^+$ (3,31 Å) $\text{NH}_3$ (3,6 Å)
Escolecita	$\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}]\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Ca	2,6 x 3,9 Å 2,5 x 4,1 Å	5	$\text{Na}^+$ (2,76 Å) $\text{Mg}^{+2}$ (3,0 Å) $\text{Fe}^{+2}$ (4,3 Å) $\text{K}^+$ (2,01 Å)
Mordenita	$(\text{Na}_2, \text{Ca}, \text{K}_2)_4[\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}]\cdot 28\text{H}_2\text{O}$	Na, Ca, K	6,5 x 7,0 Å 2,6 x 5,7 Å	2,29	$\text{Ca}^{+2}$ (4,12 Å) $\text{NH}_4^+$ (3,31 Å) $\text{K}^+$ (2,01 Å) $\text{NH}_3$ (3,6 Å)
Estilbita	$(\text{Ca}_{0,5}, \text{Na}, \text{K})_9[\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}]\cdot 28\text{H}_2\text{O}$	Ca, Na, K e Mg	4,7 x 5,0 Å 2,7 x 5,6 Å	2,5	$\text{Na}^+$ (2,76 Å) $\text{K}^+$ (2,01 Å) $\text{Ca}^{+2}$ (4,12 Å) $\text{NH}_4^+$ (3,31 Å) $\text{NH}_3$ (3,6 Å)
Laumontita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48})\cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Ca	4,6 x 6,3 Å	4,25	$\text{Ca}^{+2}$ (4,12 Å) $\text{NH}_4^+$ (3,31 Å) $\text{NH}_3$ (3,6 Å) $\text{K}^+$ (2,01 Å) $\text{Na}^+$ (2,76 Å)

**Tabela 5.5** - Resultados analíticos para nutrientes e micronutrientes em onze amostras de basaltos amigdaloides associados a lobos da Formação Torres nos domínios Litoral Norte, Região Metropolitana e Central, além de brechas encaixantes do corpo intrusivo da Pedreira Ouro Preto, do Domínio Central.

AMOSTRAS BASALTOS AMIGDALÓIDES															
AMOSTRA/LOCAL	MACRONUTRIENTES (%)				MICRONUTRIENTES (PPM)						ELEMENTOS BENÉFICOS (PPM)				
	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	SB	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Zn	Co	Na	Se	Si	V
MB-001.D Saibreira Ramisch (B2)1	1,12	6,41	3,82	11,35	63	7,39	0,12	0,3	56	72	43,3	1,87	<0.5	23,71	196
MB-001.E Saibreira Ramisch (82)	1,23	7,9'8	3,88	13,09	68	7,43	0,11	0,2	35	56	34,9	126	<0.5	23,69	231
MB-001.F Saibreira Ramisch (B2)	1,66	4,55	0,83	7,04	15	4,32	0,03	0,1	<20	49	14,6	1,5	<0.5	26,97	86
MB-004 Saibreira Três Forquilhas (B1)	0,19	10,19	0,66	11,04	17,6	2,62	0,05	0,1	22	27	13	0,22	<0.5	24,62	65
MB-040.B Lavra Ouro Preto zeol.pura (B3)	0,15	7,86	0,27	8,28	5	0,49	0,01	0,1	<20	5	2,5	0,89	<0.5	26,77	19
MB-040.C Lavra Ouro Preto (B3)	2,32	5,13	2,63	10,08	19,1	5,81	0,09	0,7	<20	81	25,2	2,66	<0.5	27,03	192
MB-041 Lavra Bairro Fátima SCS (B3)	2,41	3,07	1,57	7,05	17,1	6,08	0,1	0,3	<20	65	23,3	1,7	<0.5	26,77	130
MB-230.C Saibreira Lino (B1)	0,34	7,46	4,97	12,77	22,2	6,68	0,1	0,8	57	61	39,4	2,1	<0.5	23,29	266
MB-252.B Pedreira Britel (B1)	2,36	5,46	3,06	10,88	36,6	5,82	0,09	0,5	32	54	23,8	2,01	<0.5	26,23	180
MB 282 Túnel UHE 14 de Julho (B3)	1,34	9,54	5,71	16,59	87,4	7,34	0,17	0,6	48	39	37,3	0,9	<0.5	23,27	257
Perfil Vale do Sol (B3)	0,99	7,26	4,76	13,01	86	6,25	0,12	0,4	78	49	36,7	1,86	<0.5	24,57	208

*pahoehoe* do Domínio Fronteira Oeste, com o mesmo objetivo de caracterização para uso agrônomo. Este tipo de amostra tem a composição sujeita a grau de variabilidade maior que a dos basaltos amigdaloides, uma vez que as brechas são constituídas por clastos amigdaloides aglutinados por proporções diversas de cimento com zeólitas e minerais de sílica, além de apresentarem porosidade inerente aos clastos de basalto e ao próprio cimento. A caracterização química das amostras procurou averiguar, antes de mais nada, alguma possibilidade de contaminantes, o que não foi constatado, tendo as amostras se mantido abaixo dos limites de EPT da norma, e, a exemplo dos basaltos amigdaloides, não foram constatados teores de Cr e Ni que pudessem apresentar nocividade em uso agrônomo (Tabela 5.6).

Zeólitas catadas foram encaminhadas para a Universidade Federal de Santa Maria e submetidas a testes de compostagem de dejetos líquidos de suínos, visando

mitigar perdas de amônia (Giacomini et al.2014; Aita e Giacomini, 2017). As exigências ambientais que cercam a pecuária suína tornam oportuna a pesquisa de materiais alternativos aos importados de Cuba, de custos elevados e embora o desempenho das zeólitas do Grupo Serra Geral até o momento tenha sido inferior ao obtido para a clinoptilolita cubana, a sua disponibilidade a baixo custo pode justificar a adequação da dosagem. A técnica prevê o uso posterior do material impregnado de compostos amoniacais na lavoura, com liberação lenta para as plantas e com redução de riscos ao meio ambiente. Também a Cooperativa Ecocitrus, de Montenegro-RS, empresa que opera no ramo da compostagem de resíduos orgânicos, vem utilizando amostras dos basaltos a zeólitas em experimentos de compostagem, sob orientação de agrônomos da Embrapa Clima Temperado – Pelotas (EBCT).

Os basaltos amigdaloides caracterizados neste trabalho podem possibilitar a formulação de fertilizantes

organominerais, em especial as rochas dos lobos da Formação Torres do Domínio Central, por se encontrarem disponíveis em regiões que são polos de pecuária suína e avícola, como os vales do Rio Taquari e Rio Pardo, além da Região Metropolitana de Porto Alegre.

Os teores de potássio e fósforo contidos em cama de aviários e de suínos, além da possibilidade de retenção de odores dos compostos nitrogenados que as zeolitas podem promover, apontam para uma perspectiva de uso bastante concreta para o emprego consorciado destes materiais.

**Tabela 5.6** - Resultados analíticos para nutrientes e micronutrientes de sete amostras de brechas de crosta superior de derrames de morfologia rubbly pahoehoe do domínio Fronteira Oeste.

AMOSTRAS BRECHA DE TOPO															
AMOSTRA/LOCAL	MACRONUTRIENTES (%)				MICRONUTRIENTES (PPM)						ELEMENTOS BENÉFICOS (PPM)				
	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	SB	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Zn	Co	Na	Se	Si	V
MIB-194.A Pedra Grande	0,96	12,6	4,03	17,59	82,6	5,48	0,13	0,1	32	32	38,6	0,76	<0.5	20,41	171
MB-194.B Pedra Grande (B4)	0,64	19,1	3,67	23,41	76,7	4,85	0,14	0,1	28	28	43,4	0,66	<0.5	17,12	158
MIB-194.C Pedra Grande (B4)	0,57	18	2,89	21,46	77,2	5,01	0,11	0,1	46	46	41,4	0,56	<0.5	17,48	107
MB-194.D Pedra Grande (B4)	1,9	7,58	4,35	13,83	97,3	5,45	0,16	0,4	47	47	40,9	1,16	<0.5	24,81	166
MB-127 Fazenda S.Antônio (B4)	0,99	16,43	6,45	23,87	110,8	5,58	0,22	0,2	<20	<20	31,5	0,82	<0.5	17,1	149
MB-141A Usina Eól. Cerro Chato III (B4)	2,7	4,86	2,6	10,16	83,5	7,67	0,15	0,6	<20	<20	41,9	0,91	<0.5	24,21	257
MB-144 Rodovia RS183 (B4)	3,48	3,56	1,28	8,32	77,2	8,41	0,16	0,8	<20	<20	41,9	1,11	<0.5	26,28	326

## 6. CONCLUSÕES

O trabalho relatado neste Informe Mineral aporta dados litoquímicos de 86 amostras de rochas do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul, e trata, adicionalmente, análises de levantamento litoquímico disponíveis em Nakamura *et al.* (2003), totalizando um banco de banco de dados que reúne 246 amostras de rochas, distribuídas por blocos ao longo das diversas regiões geográficas do estado.

As rochas são caracterizadas segundo seu potencial para constituírem agrominerais, categoria que no caso dos litotipos do Grupo Serra Geral inclui rochas com potencial para remineralizadores de solos (BRASIL 2016), condicionadores de solos (basaltos amigdaloides a zeólitas e brechas com cimento calcítico), ou para destinação a fertilizantes simples fontes de cálcio, magnésio ou potássio, e, ainda, do elemento benéfico silício (BRASIL 2018).

Espectroscopia de reflectância, difratometria de raios-X e análises químicas foram empregadas para caracterizar minerais do grupo das zeólitas, abundantes em cavidades de basaltos amigdaloides da Formação Torres, e que compõem, com o mineral calcita, o cimento de brechas de crosta superior de derrames de morfologia *rubbly pahoehoe* das Formações Vale do Sol e Alegrete.

Os intervalos estratigráficos onde a concentração de zeólitas e calcita têm potencial para constituir jazidas são descritos e contam com estimativa de espessura. A percentagem de zeólitas foi estimada em afloramentos com uso de cartas comparativas e foram selecionadas três amostras para validação por contagem de áreas classificadas através do software ENVI 5.5.

No Bloco Litoral Norte do RS, a Formação Torres constitui um pacote de lobos basálticos que atinge a espessura de 100 m no perfil Maquiné-Rolante. No pacote, alternam-se rochas ricas em zeólitas (lobos “S”, com até 30% de zeólitas) e basaltos relativamente desprovidos de cavidades preenchidas (“lobos P”). Nestas rochas, predomina a variedade de zeólita laumontita cálcica, com escolecita, e heulandita subordinadas. Algumas saibreas no município de Osório extraem os basaltos amigdaloides ou seu saibro para pavimentação.

As lavras de rochas para produção de brita se concentram, no Bloco Litoral, em derrames de composição andesito-basáltica à andesítica da Formação Vale do Sol, como também em dacitos da Formação Palmas. Dentre as rochas caracterizadas no bloco, 87% apresentam soma de bases (SB)  $\geq 9\%$  (BRASIL 2016) e 78%

têm  $K_2O \geq 1\%$ , podendo ser caracterizadas como remineralizadores de solos.

O Bloco Região Metropolitana de Porto Alegre foi definido para abordagem do potencial de jazidas de zeólitas em lobos basálticos da Formação Torres. Os lobos estão expostos em várias lavras de saibro no município de Morro Reuter. Predominam zeólitas das variedades heulandita cálcica, escolecita e laumontita cálcica, que ocorrem no preenchimento de cavidades em basaltos amigdaloides e na forma de crostas com resquícos de arenito zeolitizado intercaladas aos lobos.

No Bloco Região Central destaca-se a continuidade lateral e a espessura do pacote de lobos da Formação Torres, que perfaz 200 m de espessura no perfil Vale do Sol-Herveiras. Neste domínio, as principais variedades de zeólitas são heulandita, estilbita e escolecita, ocorrendo ainda mordenita e calcita, além de esmectita e minerais de sílica restritos.

Na região de Santa Cruz do Sul, lavras de brita expõem crostas de estilbita cálcica como cimento de brechas nas margens de centros efusivos (lavras Ouro Preto e Pinheiral).

Brechas de crosta superior de derrames de morfologia *rubbly pahoehoe* da Fm. Vale do Sol podem atingir espessura de vários metros, observando-se cimentação por calcita na matriz arenosa que envolve os clastos de basalto amigdalóide.

O Bloco Central concentra a maior parte das rochas dacíticas do Grupo Serra Geral no RS, contado também com derrames de composição riolítica. Quanto aos critérios estabelecidos em BRASIL (2016), apenas 51% das amostras analisadas têm soma de bases (SB) igual ou maior que 9%, podendo ser enquadradas na categoria de remineralizadores de solos. Isto ocorre em função da grande incidência de rochas ácidas, que apresentam tendência geoquímica a teores muito baixos de MgO e a teores de CaO sensivelmente inferiores aos dos basaltos. Este fato leva a concluir que apesar dos teores mais elevados de  $K_2O$ , os dacitos raramente se enquadram como remineralizadores de solos. No entanto, desde que confirmada sua eficiência agrônômica, as rochas dacíticas podem constituir fertilizantes simples fontes de potássio.

Dentre as 15 amostras de basaltos caracterizados no Bloco Central, nove revelaram teores de cádmio superiores ao permitido pela norma (entre 10,8 e 15,1 ppm) sendo o limite estipulado em 10 ppm de Cd.

Na região do Bloco Central, que concentra grande parte do parque industrial do RS, a grande demanda de agregados para a construção civil, assim como o incremento da produção de areia de brita, fazem com que finos de britagem de rochas dacíticas e basálticas constituam uma oportunidade de certificação de agrominerais. A proximidade das áreas de agricultura intensiva, que também se situam em grande parte nessa região, reforça esta oportunidade.

No Bloco Fronteira Oeste, constituído pela Formação Alegrete, o potencial de fontes de condicionadores de solos está ligado às espessas brechas de crosta superior dos derrames *rubbly pahoehoe* D5, D6, D7 e D8, cimentadas por calcita e com quantidades subordinadas de zeólitas. A continuidade lateral dos derrames, que é de dezenas de quilômetros e a espessura métrica das brechas assegura o potencial de jazidas.

Os derrames D5, de composição andesítica, e D6, andesito basáltico, são portadores de gemas em geodos. No momento, as lavras garimpeiras do município de Santana do Livramento encontram-se explorando ágatas em alteritos de níveis rasos dos depósitos, embora parte da província gemológica, situada em terrenos vizinhos no Uruguai, conte com grande produção de ametista em galerias subterrâneas que geram extensas pilhas de descartes.

O incremento da produção de gemas, que ainda é incipiente do lado brasileiro, poderia aportar descartes de mineração com rochas fontes de cálcio e magnésio, além de teores de potássio próprios dos litotipos de composição andesítica a andesito-basáltica, que são superiores aos dos basaltos.

Todas as rochas analisadas na Fronteira Oeste cumprem o critério de  $SB \geq 9\%$  de BRASIL (2016) e 67% das amostras apresenta  $K_2O \geq 1\%$ , podendo ser enquadradas como remineralizadores de solos.

O Bloco Região Norte, que corresponde às formações Paranapanema e Esmeralda, concentra a maior parte dos basaltos e andesitos basálticos analisados.

Todas as amostras do bloco satisfazem o critério de BRASIL (2016), quanto à soma de bases, embora pela tendência do predomínio de basaltos apenas 75% das amostras enquadrem-se como remineralizadores de solos, apresentando  $K_2O \geq 1\%$ .

Quanto aos teores de elementos potencialmente tóxicos (EPT), as rochas do Bloco Norte não apresentam, como a grande maioria das rochas do Grupo Serra Geral, impedimento por teores de arsênio ou chumbo. No entanto, este domínio conta com treze das amostras de basalto que portam teores de cádmio impróprio para uso agrônomico (Cd entre 11 e 15 ppm), sendo 10 ppm o limite declarável em BRASIL 2016. O Cd provavelmente está alocado no mineral titanomagnetita, que é relativamente estável, embora sujeito à oxidação.

O Brasil é um país agrícola com acentuada dependência de insumos importados para fertilizantes. A nova rota tecnológica, apontada pela prática de remineralização de solos e uso de rochas silicáticas como agrominerais alternativos, preconiza o emprego de materiais disponíveis nas proximidades de regiões agrícolas.

O mapa da Figura 6.1 ilustra as regiões agrícolas do Rio Grande do Sul, que coincidem, em grande parte, com os terrenos que têm por substrato geológico o Grupo Serra Geral. A metade norte do estado do Rio Grande do Sul concentra boa parte dos terrenos destinados à agricultura de cereais e de soja, sendo, também, um importante polo industrial, que conta com mineração de agregados para a construção civil em lavras de rochas basálticas e dacíticas, que têm potencial enquanto fontes de agrominerais para suprimento de Ca, Mg e K, além de micronutrientes.

Com isso, a produção intensiva de grãos do estado pode contar com a proximidade de fontes de insumos do tipo remineralizadores de solos, entre outras formas de fertilizantes formulados a partir de rochas silicáticas, favorecendo a sustentabilidade das práticas agrícolas.

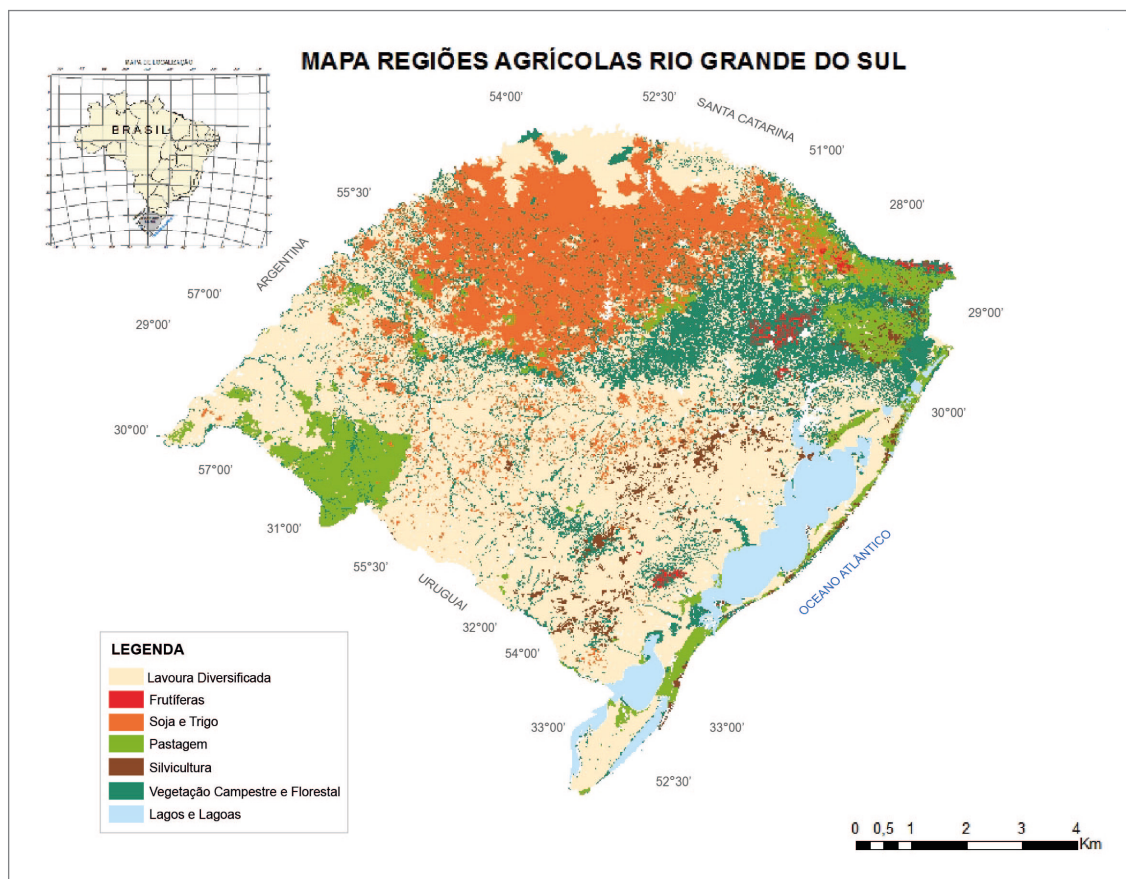
Em termos de restrições ao emprego das rochas pesquisadas, a presença do metal pesado Cd em parte das amostras de basaltos, representa restrições e ressaltam o cuidado necessário à preservação da segurança alimentar no emprego de rochas basálticas na agricultura.

Quanto às zeólitas, as assembleias de minerais deste grupo são observadas em maior quantidade em basaltos amigdaloides de lobos da Formação Torres, ao longo da zona de contato entre os primeiros derrames do Grupo Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu.

A continuidade lateral, a extensão dos derrames e a espessura das zonas mineralizadas a zeólitas, tanto em lobos amigdaloides como em brechas de crosta superior de derrames, permite inferir a existência de jazidas com potencial para extração de basaltos amigdaloides. O maior potencial se concentra em saibreiras e empreendimentos ativos que produzem brita e material para revestimento de estradas, a partir de lobos da Formação Torres nos domínios Litoral Norte, Região Metropolitana e Central.

Atualmente, o Brasil importa zeólitas de Cuba (clinoptilolita) para testes agrônomicos focados na redução de perdas de nitrogênio, entre outros usos de caráter industrial. Ao contrário das zeólitas "puras" importados para esse fim, as variedades de zeólitas presentes no basalto amigdalóide têm o potencial de adsorver diferentes elementos e moléculas, incluindo  $NH_4$ , K, Ca e Mg, que geralmente são perdidos no solo. Além disso, a presença de materiais devitrificados na matriz basáltica pode adicionar macro e micronutrientes (Ca, Mg, P, Cu, Zn) às culturas. De maneira geral, os horizontes que portam cavidades preenchidas por zeólitas nos





**Figura 6.1** - Mapa das regiões agrícolas do Rio Grande do Sul, elaborado a partir da reclassificação de dados de produção agrícola da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa. Ano base 2019.

basaltos do Grupo Serra Geral são afetados por diagênese e intemperismo, comportando argilominerais do grupo das esmectita, do tipo 2:1, com alta capacidade de troca catiônica (CTC). Isso agrega potencial a ser investigado quanto a condicionamento do solo. As práticas de pecuária suína e avicultura, que se destacam na Região Central do Rio Grande do Sul, podem fornecer materiais com teores de compostos nitrogenados, fósforo e cálcio, como camas de aviário e de pocilgas que são propícios à formulação de fertilizantes organominerais, sendo esta uma possibilidade de emprego dos basaltos amigdalóides.

Dentre as restrições ao uso dessas rochas, foi identificada a variedade de zeólita fibrosa erionita com emprego do método espectroscopia de reflectância (ER) em uma das amostras de basalto amigdalóide, além de sugerida sua presença em outras seis amostras. Embora as análises de difratometria de raios-X não tenham detectado esta zeólita que é potencialmente cancerígena, o fato denota a necessidade da caracterização cuidadosa dos basaltos amigdalóides para uso agrônômico. O emprego de rochas

pulverizadas implica no seu manejo por agricultores e também difunde a sua presença no ambiente, através de poeiras que podem ser dispersas pelo vento.

Dado ao caráter preliminar do presente trabalho, fica a recomendação de que sejam validadas, através de outros métodos, as análises de ER, que acusaram a presença da zeólita fibrosa erionita.

Concluindo, o trabalho desenvolvido pelo SGB-CPRM procurou caracterizar, na medida do possível e em grandes traços, as rochas do Grupo Serra Geral do Rio Grande do Sul, apontando as potencialidades e os riscos do emprego destas fontes de insumos alternativos para a agricultura. Com a caracterização aportada pelo presente trabalho, a empresa espera ter contribuído para a integração das cadeias produtivas mineral e agrícola, indicando rochas que devem ser necessariamente submetidas a testes agrônômicos e, a depender de seus resultados, possam se constituir em subprodutos ou mesmo produtos de mineração próprios para uso na agricultura.

## 7. REFERÊNCIAS

- AITA, C.; GIACOMINI, D. A. Uso de remineralizadores no processo de compostagem de dejetos líquidos de suínos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 3., 2016, Pelotas, RS. **Anais** [...]. Pelotas, RS: Embrapa, 2016. p. 373-386.
- ALMEIDA, E.; SILVA, F. J. P. S. Transição agroecológica de sistemas produtivos familiares no sul do Paraná e planalto norte catarinense : o relato da experiência com o pó de basalto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2009, Brasília, DF. **Anais** [...] Brasília, DF: Fundação Sonia Ivar, 2009. v. 1. p. 167-181.
- ANDA, M.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Improving chemical properties of a highly weathered soil using finely ground basalt rocks. **Catena**, v. 124, p. 147-161, 2015.
- ANDERSON, S. W.; STOFANER, S. M.; REKAR, S. E.; GUEST, J. E.; WOOD, B. Evidence for pulsed inflation of 505 pahoehoe sheet flows from surface fractures: Implication for the emplacement of continental flood basalts. **Earth and Planetary Science Letters**, v.168, p. 7-18, 1999.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (Brasil). **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2019. Disponível em: [https://anda.org.br/pesquisa\\_setorial/](https://anda.org.br/pesquisa_setorial/). Acesso em: 31 jul. 2019.
- BANDEIRA, R.J.; MARTINAZZO, R.; BERGMANN, M.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; GRECCO, M. F. Seletividade teórica dos basaltos amigdaloides à zeolitas do RS para os cátions NH<sup>4+</sup>, K<sup>+</sup> Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2., 2013, Poços de Caldas, MG. **Resumos** [...]. Poços de Caldas, MG: Petrobras; Embrapa, 2013.
- BEERLING, D. J.; LEAKE, J. R.; LONG, S. P.; SCHOLLES, J. D.; TON, J.; NELSON, P. N.; BIRD, M.; KANTZAS, E.; TAYLOR, L. L.; SARKAR, B.; KELLAND, M.; DELUCIA, E.; KANTOLA, I.; MULLER, C.; RAU, G.; HANSEN, J. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. **Nature plants**, v. 4, n. 3, p. 138, 2018.
- BELLIENI, G.; PICCIRILLO, E. M.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MELFI, A. J.; DA ROIT, P. Mineral chemistry of continental stratoid volcanics and related intrusives from Paraná basin (Brazil). In: PICCIRILLO, E. M.; MELFI, A. J. (ed.) **The mesozoic flood volcanism of the Paraná basin**: petrogenetic and geophysical aspects. São Paulo: IAG-USP, 1988 p.73-92.
- BERGMANN, M. Distribuição e potencial de aproveitamento econômico dos basaltos amigdalóides a zeolitas do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul, Brasil. In: HARTMANN, L. A.; BAGGIO, S. B. (org.). **Metalogenia e exploração mineral no Grupo Serra Geral**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014. p.261-275.
- BERGMANN, M.; JUCHEM, P. L.; PETROLI, L.; SANDER, A. Caracterização litoquímica e petrográfica de riocitos vítreos mineralizados com ametista no RS: possíveis fontes de potássio e multinutrientes para remineralização de solos. In: AÇÕES aplicadas à cadeia produtiva de gemas e joias do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2017. v.01, p. 26-35.
- BERGMANN, M.; PROVENZANO, C. A. S. **Geologia e recursos minerais da folha Três Passos, SG.22-Y-C-I**: estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2014. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/18036>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- BERGMANN, M.; ROCHA, P. M.; SANDER, A.; PARISI, G. N. **Modelo prospectivo para ametista e ágata na fronteira oeste do Rio Grande do Sul**: carta geológica e de recursos minerais. Porto Alegre: CPRM, 2020. Informe de Recursos Minerais. Série Províncias Minerais do Brasil, n. 29. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18795>. Acesso em: 13 jan. 2021.
- BERGMANN, M.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; MARTINAZZO, R.; GRECCO, M. F. Considerações sobre o potencial de uso agrônômico das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. da; DONATO, M.I.(Org.). **Tecnologia e inovação em gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014. p.119-126.
- BERNARDI, A. C. C.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; BARROS, F. S. Dry matter production and nutrient accumulation after successive crops of lettuce, tomato, rice, and andropogongrass in a substrate with zeolite. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, São Paulo, v. 34, p. 435-442, 2010.
- BISCH, D.; MING, D. W. (ed.) **Natural Zeolites**: occurrence, properties, applications. Berlim: De Gruyter, 2001. (Reviews in Mineralogy & Geochemistry, v.45).
- BLASKOWSKI, A. E.; BERGMANN, M.; CAVALCANTE, A. **Projeto agrominerais da região de Irecê - Jaguarari**: estado da Bahia. Salvador: CPRM, 2016. (Série Insumos Minerais para Agricultura, 19.) Disponível em:<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17699>. Acesso em:12 jan. 2021.
- BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa Nº 05 de 10 de março de 2016. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, n.49, p. 10,10 mar. 2016. Disponível em: <https://www.in.gov.br/leiturajournal?data=14-03-2016&secao=DO1>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa Nº 06 de 10 de março de 2016.

- Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, n.49, p. 11,10 mar. 2016. Disponível em: <https://www.in.gov.br/leiturajornal?data=14-03-2016&secao=DO1>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa Nº 39 de 8 de agosto de 2018 **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 ago. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-39-2018-fert-minerais-versao-publicada-dou-10-8-2018.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2021.
- BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA Nº 27 de 5 de junho de 2006. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, 9 jun. 2006. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=76854>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA Nº 35 de 4 de julho de 2006. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, n.132, p. 11,12 jul. 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- BRASIL. Presidência da República. Lei n. 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 dez. 1980. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=6894&ano=1980&ato=b74cXVU9UMrVt3be>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- BRASIL. Presidência da República. Lei n.12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências.. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 dez. 2013. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12890&ano=2013&ato=995kXQq50MvPwTf93>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- BRECK, D. W. Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use. **Journal of Chromatographic Science**, v. 13, n.4, p.18A, apr. 1975. Disponível em: <https://academic.oup.com/chromsci/article-abstract/13/4/18A/357490>. Acesso em: 14 jan. 2021.
- CARVALHO, A. M. X.; DELIBERALI, D. C.; COSTA, M. D.; CARDOSO, I. M. Plantas, micorrizas e microbiota do solo na disponibilização de nutrientes de pós de rocha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2., 2013, Poços de Caldas, MG. **Anais** [...]. Poços de Caldas, MG: [s.n.], 2013. p.13-23.
- CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; CURTI, N.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, p. 69-74, 2000.
- CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, C. D.; FERNANDES, L. A.; CURTI, N.; RODRIGUES, D. C. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.36, p. 557-565, 2001.
- CHIPERA, S. J.; APPS, J. A. Geochemical Stability of Natural Zeolites. In: BISH, D. L.; MING, D. W. (ed.). **Natural zeolites: occurrence, properties, applications**. Berlin: De Gruyter, 2001. p.117-157.(Reviews in Mineralogy & Geochemistry, v. 45)
- CLOUTIS, E.; ASHER, P.; MERTZMAN, S. Spectral reflectance properties of zeolites and remote sensing implications. **Journal of Geophysical Research (Planets)**. v. 107. n. E9, 5067, p.5.1 - 5.19, 2002. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2000JE001467>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- COLELLA, C. Natural zeolites. In: CEJKA, J. (ed.). **Studies zeolites and ordered mesoporous materials: progress and prospects**. Amsterdam: Elsevier, 2005. p. 13-39. (The 1st FEZA School on Zeolites, Prague, Czech Republic,v.157).
- COOMBS, D. S.; ALBERTI, A.; ARMBRUSTER, T.; ARTIOLI, G.; COLELLA, C.; GALLI, E.; GRICE, J. D.; LIEBAU, F.; MANDARINO, J. A.; MINATO, H.; NICKEL, E. H.; PASSAGLIA, E.; PEACOR, D. R.; QUARTIERI, S.; RINALDI, R.; ROSS, M.; SHEPPARD, R. A.; TILLMANN, E.; VEZZALINI, G. Recommended nomenclature for zeolite minerals. **The Canadian Mineralogist**, Quebec, v. 35, p. 1571-1606, 1997. (Report of the Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names).
- DEER, W. A., HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Framework silicates: silica minerals, feldspathoids and zeolites**. London: The Geological Society, 1963. (Rock Forming Minerals, v. 4).
- EI HACHIMI, H.; YUBI, N.; MADEIRA, J.; BENSALAH, M. K.; MARTINS, L.; MATA, J.; BERTRAND, H.; MARZOLI, A.; MEDINA, F.; MUNHÁ, J.; BELLINI, J.; MAHMOUDI, A.; BEN ABBOU, M.; ASSAFAR, H. Morphology, internal architecture, and emplacement mechanisms of lava flows from the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) of Argana basin (Morocco). In: VAN HINSBERGEN, D. J. J.; BUITER, S.; TORSVIK, T. H.; GAINA, C.; WEBB, S. (ed.) **Out of Africa: a synopsis of 3.8 Ga of Earth History**. London: The Geological Society, 2011. p.167-193. (The Geological Society of London Special Publication, n. 357).
- FARJALLAT, J. E. S.; SUGUIO, K. Observações sobre a zeolitização em basalto e arenito, Nioaque, Mato Grosso. **Boletim da SBG**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p.51-58, 1966.
- FENG, E. Y.; KOEVE, W.; KELLER, D. P.; OSCHLIES, A. Model-Based Assessment of the CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Coastal Ocean Alkalinization. **Earth's Future**, v. 5, n. 12, p. 1252-1266, 2017.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. **The Guarani aquifer initiative: towards realistic groundwater management in a transboundary context**. Washington (DC):The World Bank, 2009. (Case Profile Collection, 9).

- FRANCO, R. R. Zeólitas dos basaltos do Brasil meridional: gênese e paragênese. **Boletim Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras Univ. de São Paulo**, v.150, p.1-69,1952.
- FRANK, H. T. **Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na Formação Serra Geral (Bacia do Paraná)**. 2008. 322 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- FRANK, H. T.; FORMOSO, M. L. L.; GOMES, M. E. B. Minerais secundários na Formação Serra Geral (Bacia do Paraná). In: SEMANA ACADÊMICA DOS ALUNOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS, 1., 2006, Porto Alegre. **Anais[...]** Porto Alegre: UFRGS, 2006.
- FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. Carbonatos de Mg, Fe e Mn e outros minerais secundários de um derrame de lava basáltico da Formação Serra Geral (Bacia do Paraná, América do Sul): descrição e seqüência de cristalização. In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 4., 2008, Foz do Iguaçu, PR. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, PR: SBG, 2008.
- FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, RS, v. 36, n.1, p. 49-57, jan./abr., 2009.
- FRANK, H. T.; SIMAS M. W.; WAICHEL B. L.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. Phacolite (chabazite-CA) from a basaltic lava flow of the Serra Geral Formation (Paraná Basin, South America). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2008, Curitiba. **Anais [...]** Curitiba: SBG, 2008. p. 565.
- FREITAS, M. A. de; ECKERT, R. M.; CAYE, B. R. **Projeto Oeste de Santa Catarina-PROESC: diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do estado de Santa Catarina**. Florianópolis: CPRM, 2002. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/4957>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- GIACOMINI, D. A.; AITA, C.; PUJOL, S. B.; GIACOMINI, S. J.; DONEDA, A.; ANTU, R. R.; DESSBESEL, A. LÜDTKE, R. C.; SILVEIRA, C. A. P. Mitigação das emissões de amônia por zeólitas naturais durante a compostagem por resíduos de suínos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n.7, p. 521-530, 2014.
- GODOY, M. M.; SCHERER, O. L. B.; BINOTTO, R. B.; GROSS, A. O. M.; DREHER, A. M. **Geologia e recursos minerais da Folha Sobradinho - SD. 22-V-CII, Escala 1:100.000, Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2016. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17254>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- GRECCO, M. F.; BERGMANN, M.; BAMBERG, A. L.; SILVEIRA, C. A. P.; MARTINAZZO, R. Potencial da rocha dacítica da pedreira Brita Pinhal, Itaara-RS, Brasil para remineralização de solos. In: WORKSHOP INSUMOS PARA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL, 2012, Pelotas, RS. **Resumos Expandidos [...]** Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2012.
- HARTMANN, L. A.; WILDNER, W.; DUARTE, L. C.; DUARTE, S. K.; PERTILLE, J.; ARENA, K. R.; MARTINS, L. C.; DIAS, N. L. Geochemical and scintillometric characterization and correlation of amethyst geode-bearing Paraná lavas from the Quaraí and Los Catalanes districts, Brazil and Uruguay. **Geological Magazine**, v.147, p.954-970, 2010..
- HEEMANN, R. **Modelagem estrutural e tridimensional para a prospecção e avaliação dos depósitos de ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (RS)**. 2005. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- HON, K.; GANSECKI, C.; KAUAHIKAU, J. The transition from 'a'a to pahoehoe crust on flows emplaced during the Pu'u 'O'o-Kupaianaha eruption. **U.S Geol. Survey Professional Paper**, n. 1676, p. 89-103, 2003.
- JANASI, V. A.; NEGRI, F.A.; MONTANHEIRO, T. J.; FREITAS, V. A.; ROCHA, B. C.; REIS, P. M. Geochemistry of the eocretacic basalt magmatism in the Piraju-Ourinhos region, SE Brazil, and implications to the stratigraphy of the Serra Geral Formation. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 2007 p.148-162. Disponível em: <http://papegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9294/8774>. Acesso em: 14 jan. 2021.
- JUCHEM P. L.; HARTMANN, L. A.; MASSONE, H. J.; THEYE, T. Oxygen isotope composition of amethyst and related silica minerals in volcanic rocks from the Paraná province, southern Brazil CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUIMICA, 12, ; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY, 8. 2009. Ouro Preto, MG. **Resumos [...]** Ouro Preto: SBGq/UFOP, 2009. p. 6.
- KAMPRATH. E. J. **Phosphorus fixation and availability in highly weathered soils**. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 4., 1976, Brasília. São Paulo: USP, 1977. p. 333-347.
- KOKALY, R. F.; CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; LIVO, K. E.; HOEFEN, T. M.; PEARSON, N. C.; WISE, R. A.; BENZEL, W. M.; LOWERS, H. A.; DRISCOLL, R. L.; KLEIN, A. J. **USGS Spectral Library Version 7**. Washinton, D. C.: USGS, 2017. (U.S. Geological Survey Data Series, v. 1035). Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/ds/1035/ds1035.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- KORCHAGIN, J.; CANER, L.; BORTOLUZZI, E. C. Variability of amethyst mining waste: A mineralogical and geochemical approach to evaluate the potential use in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 749-758, 2019.
- KRAMER, M. G.; CHADWICK, O. A. Carbon storage and weathering in volcanic soils across a high-elevation climate gradient on Mauna Kea, Hawaii. **Ecology**, v. 97, n. 9, p. 2384-2395, 2016.
- KRAMER, M. G.; CHADWICK, O. A. Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 12, p. 1104, 2018.
- KRAMER, M. G.; CHADWICK, O. A. Controls on carbon storage and weathering in volcanic soils across a high-

- elevation climate gradient on Mauna Kea, Hawaii. **Ecology**, v.97, p.2384–2395, 2016.
- LE BAS, M. J.; LE MAITRE, R. W.; STRCKEISEN, A.; ZANETTIN, B. Chemical classification of volcanic-rocks based on the total alkali silica diagram. **Journal of Petrology**, v. 27, n. 3, p. 745-750, jun.1986.
- LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. 1997. 84 f. Tese (Doutorado em Agronomia) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1987.
- LEFEBVRE, D.; GOGGIO, P.; WILLIAMS, A.; MANNING, D. A. C.; AZEVEDO, A. C.; BERGMANN, M.; MEERSMANN, P. S. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: a case study for São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p.p468-481, 2019.
- LEONARDOS, O. H.; FYFE, W.S.; KROMBERG, B. Rochagem: método de aumento de fertilidade de solos lixiviados e arenosos. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 19, 1976, Belo Horizonte, MG. **Anais [...]** Belo Horizonte, MG. 1976. p. 137-145.
- LI, C.; HAN, Q.; LUO, G.; ZHAO, C.; LI, S.; WANG, Y.; YU, D. Effects of cropland conversion and climate change on agrosystem carbon balance of China's dryland: atypical watershed study. **Journal of Sustainability**, China, v. 10, n. 12, p. 4508, 2018.
- LUZ, A. B. **Zeólitas: propriedades e usos industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1995. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/132>. Acesso em: 14 jan. 2021.
- MANNING, D. A. C.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, v. 7, n. 2, p. 480-487, 2020.
- McBAIN, J. W. **The sorption of gases and vapors by solids**. London: Rutledge and Sons, 1932.
- MALAVOLTA, E. **Adbos e adubação fosfatada**. Viçosa, MG: Fertilizantes Mitsui, 1985.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.
- MALAVOLTA, E. **O futuro da nutrição de plantas tendo em vista aspectos agronômicos, econômicos e ambientais**. Piracicaba, SP: IPNI, 2008.
- MORAN, C. J.; KUNZ, N. C. Sustainability as it pertains to minerals and energy supply and demand: a new interpretative perspective for assessing progress. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p.16-26, 2014.
- MORTEANI, G.; KOSTITSYN, Y.; PREINFALK, C.; GILG, H. A. The genesis of the amethyst geodes at Artigas (Uruguay) and the paleohydrology of the Guaraní aquifer: structural, geochemical, oxygen, carbon, strontium isotope and fluid inclusion study. **International Journal of Earth Sciences**, v. 99, p.927-947, 2010.
- MUMPTON, F. A. The rol of natural Zeolites *in* agriculture and aquaculture. In: POND, W.G.; MUMPTON, F. A. (ed.) **ZeoAgriculture: use of natural zeolites in agriculture and aquaculture**. Bulder, CO: Westview Press, 1984. p. 3-27.
- NAKAMURA, K.; SHIBUIA, A.; NASUTA, K.; MURAKAMI, T.; WILDNER, W.; ROMANINI, S. J. **Mineral exploration of the Cu-Ni PGE deposits in the Paraná basin Southern Brazil: phase II**. Tokyo: JMEC/CPRM, 2003.
- NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.38, n.1, p.178-195, 2008.
- NEUHOFF, P. S.; FRIDRICKSSON, T.; ARNÓRSSON, S.; BIRD, D. K. Porosity evolution and Mineral Paragenesis during Low-Grade Metamorphism of basaltic lavas at Teigarhorn, Eastern Iceland. **American Journal of Science**, v. 299, p. 467-501, 1999.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- NUNES, J. M. G.; KAUTZMANN, R. M.; OLIVEIRA, C. Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 649-656, 2014.
- PEATE, D. W. The Paraná-Etendeka Province. In: MAHONEY, J. J.; COFFIN M.F. (ed.) **Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism**. s.l.: American Geophysical Union, 1997. p.217-245. (Geophys. Monogr., n.100).
- PINTO, V. M.; HARTMANN, L. A.; SANTOS, J. O. S.; MCNAUGHTON, N. J.; WILDNER, W. Zircon U–Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~135 Ma. **Chemical Geology**, v. 281, p. 93-102, 2011.
- POZZA, A. A. A.; CURI, N.; COSTA, E. T. S.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; MOTTA, P. E. F. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 11, p. 1627-1633, 2007.
- RAMOS, C. G.; QUEROL, X.; DALMORA, A. C.; DE JESUS PIRES, K. C.; SCHNEIDER, I. A. H.; OLIVEIRA, L. F. S.; KAUTZMANN, R. M. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2700-2706, 2017.
- REZENDE, N. das G. de A. da M. **Argilas nobres e zeólitas na Bacia do Parnaíba: relatório final de projeto**. Belém: CPRM, 1997. (Informe de Recursos Minerais. Série Diversos, 02). Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/1563>. Acesso em: 13 ago. 2019.
- REZENDE, N. das G. de A. da M.; ANGÉLICA, R. S. Geologia das zeolitas sedimentares no Brasil. In: SCHOBENHAUS, C.;

- QUEIROZ, E. T.; COELHO, C. E. S. (Ed.) **Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais**. Brasília: DNPM/CPRM, 1997.v. 4-B, p.193-212.
- REZENDE, N. das G. de A. da M.; ANGELICA, R. S. Sedimentary zeolites in Brazil. **Mineralogica et Petrographica Acta**, v. 42, p. 71-82, 1999.
- RIBEIRO, R. C.; MACHADO, R. V.; ANDRADE, F. V.; CAZOTTI M. M. Associação da compostagem ao processo de rochagem visando a liberação de potássio. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2., 2013, Poços de Caldas, MG. **Resumos** [...]. Poços de Caldas, MG: Petrobras; Embrapa, 2013. p.51-57.
- ROSSETTI, L.; LIMA, E. F. de; WICHEL, B. L.; HOLE.M. J.; SIMÕES, M. S.; SCHERER, C. M. S. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group,Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, Amsterdam, v. 355, p. 98-114, abr. 2018.
- RUSSEL, E. W. **Soil conditions and plant growth**. 10.ed. Londres: Longman, 1976.
- SELF, S.; THORDARSON, T.; KESZTHELYI, L. Emplacement of continental flood basalts flows. *In*: MAHONEY J. J.; COFFIN M. (ed.) **Large Igneous Provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism**. [s.l.]: American Geophysical Union, 1997. p.381-410. (Am. Geophys. Union Geophys. Monogr., n.100).
- SHEPPARD, R. A.; HAY R. L. Formation of zeolites in open hydrologic systems. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 45, n.1, p. 261–275, 2001. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/rimg/article-abstract/45/1/261/140729/Formation-of-Zeolites-in-Open-Hydrologic-Systems?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- SILVEIRA, C. A. P; CARDOSO, J. H.; CRUZ, M. T. P.; SANDER, A.; MICHELIN, C.; ARAÚJO, V. F.; BECKER, S.; BALDEZ, D. L.; PERES, M. M.; KOHLER, T. W. **Produção de biomassa e acúmulo de nutrientes em plantas de Tithonia diversifolia a partir de diferentes agrominerais**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2018.
- SIMAS, M. W.; SCHENATO, F.; FORMOSO, M. L. L. Estudo das zeolitas de um derrame de basalto, região de Morro Reuter (Bacia do Paraná, RS). *In*: SIMPOSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 1., 1999. Gramado, RS. **Resumos** [...] Gramado, RS: SBG, 1999.
- SOARES, F. S. **Caracterização e aplicação de zeolitas naturais**. 2010. 196 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.
- STANFORD, N. P. Rochas fosfatadas e potássicas com micro-organismos e matéria orgânica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 3., 2016, Pelotas, RS. **Anais** [...]. Pelotas, RS: Embrapa, 2016. p.189- 200.
- SURDAM, R. C. Zeolites in closed hydrologic systems. *In*: MUMPTON, F.A. (ed.). **Mineralogy and geology of natural zeolites**. New York: Mineralogical Society of America, 1977. p. 65-91 (Mineralogical Society of America Short Course Notes) ( Reviews in Mineralogy, v. 4).
- THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Stonemeal: principles, potential and perspective from Brazil. *In*: GOREAU, T. J.; LARSON, R. W.; CAMPE, J. (ed.). **Geotherapy: innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO<sup>2</sup> increase**.Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 403–418.
- THORDASON, T.; SELF, S. The Roza member, Columbia River Basalt Group: agigantic pahoehoe lava flow field formed by endogenous processes? **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p.27411-27445, 1998.
- VAN STRAATEN, P. **Agrogeology: the use of rocks for crops**. Ontario, Canada: Enviroquest, 2007.
- WILDNER, W.; ARIOLI, E. E.; LICHT, O. A. B.; COSTA, V. S.; CARRILHO, J. C.; LONGO, E. G.; CANTARINO, S. C.; SANDER, A.; PERROTA, M.; SOUZA FILHO, C. R. Geologia e Petrografia. *In*: BRITO, R. S. C. de; WILDNER, W.; LICHT, O. A. B.; ARIOLI, E. E. (coord.) **Geologia e recursos minerais do sudoeste do estado do Paraná**. Brasília, DF: CPRM, 2006. p. 9-35.
- WILDNER, W. Estratigrafia do Magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná-Conceitos básicos e divisão faciológica. *In*: REUNIÃO ABERTA DA COMISSÃO BRASILEIRA DE ESTRATIGRAFIA, 2004. **Anais** [...] Porto Alegre: SBG, 2004.p. 62-67.
- WILDNER W.; HARTMANN, L. A.; LOPES, R. da C. Serra Geral magmatism in the Paraná Basin: a new stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. *In*: IANNUZZI, R.; BOARDMANN, D. R. (Ed.). **Problems in Western Gondwana Geology**. Gramado-RS: SBG;UFRGS, 2007. p.189-195.
- WILDNER, W.; LOPES, R. da C.; ROMANINI, S. J.; CAMOZZATO, E. Contribuição à estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná. *In*: ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: Escudo e Bacias, 1., 2003, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: ILEA/UFRGS, 2003. p. 204-210.
- WILDNER, W.; RAMGRAB, G. E.; LOPES, R. da C.; IGLESIAS, C. M. da F. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2008. Escala 1:750.000. Programa Geologia do Brasil. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10301>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- WILMOUTH R. A.; WALKER G. P. L. P-Type and S-type pahoehoe: a study of vesicledistribution patterns in Hawaiian lava flows. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 55, p.129-142, 1993.

## LISTAGEM DOS INFORMES DE RECURSOS MINERAIS

---

## **LISTAGEM DOS INFORMES DE RECURSOS MINERAIS**

### **SÉRIE METAIS DO GRUPO DA PLATINA E ASSOCIADOS**

- Nº 01 - Mapa de Caracterização das Áreas de Trabalho (Escala 1:7.000.000), 1996.
- Nº 02 - Mapa Geológico Preliminar da Serra do Colorado - Rondônia e Síntese Geológico-Metalogenética, 1997.
- Nº 03 - Mapa Geológico Preliminar da Serra Céu Azul - Rondônia, Prospecção Geoquímica e Síntese Geológico-Metalogenética, 1997.
- Nº 04 - Síntese Geológica e Prospecção por Concentrados de Bateia nos Complexos Canabrava e Barro Alto - Goiás, 1997.
- Nº 05 - Síntese Geológica e Prospecção Geoquímica/Aluvionar da Área Migrantinópolis - Rondônia, 2000.
- Nº 06 - Geologia e Prospecção Geoquímica/Aluvionar da Área Corumbiara/Chupinguaia - Rondônia, 2000.
- Nº 07 - Síntese Geológica e Prospecção Geoquímica/Aluvionar da Área Serra Azul - Rondônia, 2000.
- Nº 08 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Rio Branco/Alta Floresta - Rondônia, 2000.
- Nº 09 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Santa Luzia - Rondônia, 2000.
- Nº 10 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Nova Brasilândia - Rondônia, 2000.
- Nº 11 - Síntese Geológica e Prospecção Geoquímica da Área Rio Madeirinha - Mato Grosso, 2000.
- Nº 12 - Síntese Geológica e Prospectiva das Áreas Pedra Preta e Cotingo - Roraima, 2000.
- Nº 13 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Santa Bárbara - Goiás, 2000.
- Nº 14 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Barra da Gameleira - Tocantins, 2000.
- Nº 15 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Córrego Seco - Goiás, 2000.
- Nº 16 - Síntese Geológica e Resultados Prospectivos da Área São Miguel do Guaporé - Rondônia, 2000.
- Nº 17 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Cana Brava - Goiás, 2000.
- Nº 18 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Cacoal - Rondônia, 2000.
- Nº 19 - Geologia e Resultados Prospectivos das Áreas Morro do Leme e Morro Sem Boné - Mato Grosso, 2000.
- Nº 20 - Geologia e Resultados Prospectivos das Áreas Serra dos Pacaás Novos e Rio Cautário - Rondônia, 2000.
- Nº 21 - Aspectos Geológicos, Geoquímicos e Potencialidade em Depósitos de Ni-Cu-EGP do Magmatismo da Bacia do Paraná - 2000.
- Nº 22 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Tabuleta - Mato Grosso, 2000.
- Nº 23 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Rio Alegre - Mato Grosso, 2000.
- Nº 24 - Geologia e Resultados Prospectivos da Área Figueira Branca/Indiavaí - Mato Grosso, 2000.
- Nº 25 - Síntese Geológica e Prospecção Geoquímica/Aluvionar das Áreas Jaburu, Caracaraí, Alto Tacutu e Amajari - Roraima, 2000.
- Nº 26 - Prospecção Geológica e Geoquímica no Corpo Máfico-Ultramáfico da Serra da Onça - Pará, 2001.
- Nº 27 - Prospecção Geológica e Geoquímica nos Corpos Máfico-Ultramáficos da Suíte Intrusiva Cateté - Pará, 2001.
- Nº 28 - Aspectos geológicos, Geoquímicos e Metalogenéticos do Magmatismo Básico/Ultrabásico do Estado de Rondônia e Área Adjacente, 2001.
- Nº 29 - Geological, Geochemical and Potentiality Aspects of Ni-Cu-PGE Deposits of the Paraná Basin Magmatism, 2001.
- Nº 30 - Síntese Geológica e Prospecção Geoquímica da Área Barro Alto – Goiás, 2010.

### **SÉRIE MAPAS TEMÁTICOS DE OURO - ESCALA 1:250.000**

- Nº 01 - Área GO-09 Aurilândia/Anicuns - Goiás, 1995.
- Nº 02 - Área RS-01 Lavras do Sul/Caçapava do Sul - Rio Grande do Sul, 1995.
- Nº 03 - Área RO-01 Presidente Médici - Rondônia, 1996.
- Nº 04 - Área SP-01 Vale do Ribeira - São Paulo, 1996.
- Nº 05 - Área PA-15 Inajá - Pará, 1996.
- Nº 06 - Área GO-05 Luziânia - Goiás, 1997.
- Nº 07 - Área PA-01 Paru - Pará, 1997.
- Nº 08 - Área AP-05 Serra do Navio/Cupixi - Amapá, 1997.
- Nº 09 - Área BA-15 Caripará - Bahia, 1997.
- Nº 10 - Área GO-01 Crixás/Pilar - Goiás, 1997.
-



Nº 11 - Área GO-02 Porangatu/Mara Rosa - Goiás, 1997  
Nº 12 - Área GO-03 Niquelândia - Goiás, 1997.  
Nº 13 - Área MT-01 Peixoto de Azevedo/Vila Guarita - Mato Grosso, 1997.  
Nº 14 - Área MT-06 Ilha 24 de Maio - Mato Grosso, 1997.  
Nº 15 - Área MT-08 São João da Barra - Mato Grosso/Pará, 1997.  
Nº 16 - Área RO-02 Jenipapo/Serra Sem Calça - Rondônia, 1997.  
Nº 17 - Área RO-06 Guaporé/Madeira - Rondônia, 1997.  
Nº 18 - Área RO-07 Rio Madeira - Rondônia, 1997.  
Nº 19 - Área RR-01 Uraricaá - Roraima, 1997.  
Nº 20 - Área AP-03 Alto Jari - Amapá/Pará, 1997.  
Nº 21 - Área CE-02 Várzea Alegre/Lavras da Mangabeira/Encanto - Ceará, 1997.  
Nº 22 - Área GO-08 Arenópolis/Amorinópolis - Goiás, 1997.  
Nº 23 - Área PA-07 Serra Pelada - Pará, 1997.  
Nº 24 - Área SC-01 Botuverá/Brusque/Gaspar - Santa Catarina, 1997.  
Nº 25 - Área AP-01 Cassiporé - Amapá, 1997.  
Nº 26 - Área BA-04 Jacobina Sul - Bahia, 1997.  
Nº 27 - Área PA-03 Cuiapucu/Carará - Pará/Amapá, 1997.  
Nº 28 - Área PA-10 Serra dos Carajás - Pará, 1997.  
Nº 29 - Área AP-04 Tumucumaque - Pará, 1997.  
Nº 30 - Área PA-11 Xinguara - Pará, 1997.  
Nº 31 - Área PB-01 Cachoeira de Minas/Itajubatiba/Itapetim - Paraíba/Pernambuco, 1997.  
Nº 32 - Área AP-02 Tartarugalzinho - Amapá, 1997.  
Nº 33 - Área AP-06 Vila Nova/Iratapuru - Amapá, 1997.  
Nº 34 - Área PA-02 Ipitinga - Pará/Amapá, 1997.  
Nº 35 - Área PA-17 Caracol - Pará, 1997.  
Nº 36 - Área PA-18 Vila Riozinho - Pará, 1997.  
Nº 37 - Área PA-19 Rio Novo - Pará, 1997.  
Nº 38 - Área PA-08 São Félix - Pará, 1997.  
Nº 39 - Área PA-21 Marupá - Pará, 1998.  
Nº 40 - Área PA-04 Três Palmeiras/Volta Grande - Pará, 1998.  
Nº 41 - Área TO-01 Almas/Natividade - Tocantins, 1998.  
Nº 42 - Área RN-01 São Fernando/Ponta da Serra/São Francisco - Rio Grande do Norte/Paraíba, 1998.  
Nº 43 - Área GO-06 Cavalcante - Goiás/Tocantins, 1998.  
Nº 44 - Área MT-02 Alta Floresta - Mato Grosso/Pará, 1998.  
Nº 45 - Área MT-03 Serra de São Vicente - Mato Grosso, 1998.  
Nº 46 - Área AM-04 Rio Traíra - Amazonas, 1998.  
Nº 47 - Área GO-10 Pirenópolis/Jaraguá - Goiás, 1998.  
Nº 48 - Área CE-01 Reriutaba/Ipu - Ceará, 1998.  
Nº 49 - Área PA-06 Manelão - Pará, 1998.  
Nº 50 - Área PA-20 Jacareacanga - Pará/Amazonas, 1998.  
Nº 51 - Área MG-07 Paracatu - Minas Gerais, 1998.  
Nº 52 - Área RO-05 Colorado - Rondônia/Mato Grosso, 1998.  
Nº 53 - Área TO-02 Brejinho de Nazaré - Tocantins, 1998.  
Nº 54 - Área RO-04 Porto Esperança - Rondônia, 1998.  
Nº 55 - Área RO-03 Parecis - Rondônia, 1998.  
Nº 56 - Área RR-03 Uraricoera - Roraima, 1998.  
Nº 57 - Área GO-04 Goiás - Goiás, 1998.  
Nº 58 - Área MA-01 Belt do Gurupi - Maranhão/Pará, 1998.  
Nº 59 - Área MA-02 Aurizona/Carutapera - Maranhão/Pará, 1998.  
Nº 60 - Área PE-01 Serrita - Pernambuco, 1998.  
Nº 61 - Área PR-01 Curitiba/Morretes - Paraná, 1998.  
Nº 62 - Área MG-01 Pitangui - Minas Gerais, 1998.  
Nº 63 - Área PA-12 Rio Fresco - Pará, 1998.

---

- Nº 64 - Área PA-13 Madalena - Pará, 1998.  
Nº 65 - Área AM-01 Parauari - Amazonas/Pará, 1999.  
Nº 66 - Área BA-01 Itapicuru Norte - Bahia, 1999.  
Nº 67 - Área RR-04 Quino Maú - Roraima, 1999.  
Nº 68 - Área RR-05 Apiaú - Roraima, 1999.  
Nº 69 - Área AM 05 Gavião/Dez Dias - Amazonas, 1999.  
Nº 70 - Área MT-07 Araés/Nova Xavantina - Mato Grosso, 2000.  
Nº 71 - Área AM-02 Cauaburi - Amazonas, 2000.  
Nº 72 - Área RR-02 Mucajaí - Roraima, 2000.  
Nº 73 - Área RR-06 Rio Amajari - Roraima, 2000.  
Nº 74 - Área BA-03 Jacobina Norte - Bahia, 2000.  
Nº 75 - Área MG-04 Serro - Minas Gerais, 2000.  
Nº 76 - Área BA-02 Itapicuru Sul - Bahia, 2000.  
Nº 77 - Área MG-03 Conselheiro Lafaiete - Minas Gerais, 2000.  
Nº 78 - Área MG-05 Itabira - Minas Gerais, 2000.  
Nº 79 - Área MG-09 Riacho dos Machados - Minas Gerais, 2000.  
Nº 80 - Área BA-14 Correntina - Bahia, 2000.  
Nº 81 - Área BA-12 Boquira Sul - Bahia, 2000  
Nº 82 - Área BA-13 Gentio do Ouro - Bahia, 2000.  
Nº 83 - Área BA-08 Rio de Contas/Ibitiara Sul - Bahia, 2000.  
Nº 84 - Área MT-05 Cuiabá/Poconé - Mato Grosso, 2000.  
Nº 85 - Área MT-04 Jauru/Barra dos Bugres - Mato Grosso, 2000.

### **SÉRIE OURO - INFORMES GERAIS**

- Nº 01 - Mapa de Reservas e Produção de Ouro no Brasil (Escala 1:7.000.000), 1996.  
Nº 02 - Programa Nacional de Prospecção de Ouro - Natureza e Métodos, 1998.  
Nº 03 - Mapa de Reservas e Produção de Ouro no Brasil (Escala 1:7.000.000), 1998.  
Nº 04 - Gold Prospecting National Program - Subject and Methodology, 1998.  
Nº 05 - Mineralizações Auríferas da Região de Cachoeira de Minas – Municípios de Manairá e Princesa Isabel - Paraíba, 1998.  
Nº 06 - Mapa de Reservas e Produção de Ouro no Brasil (Escala 1:7.000.000), 2000.  
Nº 07 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Minas do Camaquã - Rio Grande do Sul, 2000.  
Nº 08 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Ibaré – Rio Grande do Sul, 2000.  
Nº 09 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Caçapava do Sul - Rio Grande do Sul, 2000.  
Nº 10 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Passo do Salsinho - Rio Grande do Sul, 2000.  
Nº 11 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Marmeleiro - Rio Grande do Sul, 2000.  
Nº 12 - Map of Gold Production and Reserves of Brazil (1:7.000.000 Scale), 2000  
Nº 13 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Cambaizinho - Rio Grande do Sul, 2001.  
Nº 14 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Passo do Ivo - Rio Grande do Sul, 2001.  
Nº 15 - Resultados da Prospecção para Ouro na Área RS-01 - Lavras do Sul/Caçapava do Sul, Subárea Batovi – Rio Grande do Sul, 2001.  
Nº 16 - Projeto Metalogenia da Província Aurífera Juruena-Teles Pires, Mato Grosso – Goiânia, 2008.  
Nº 17 - Metalogenia do Distrito Aurífero do Rio Juma, Nova Aripuanã, Manaus, 2010.

### **SÉRIE INSUMOS MINERAIS PARA AGRICULTURA**

- Nº 01 - Mapa Síntese do Setor de Fertilizantes Minerais (NPK) no Brasil (Escala 1:7.000.000), 1997.
-

- Nº 02 - Fosfato da Serra da Bodoquena - Mato Grosso do Sul, 2000.
- Nº 03 - Estudo do Mercado de Calcário para Fins Agrícolas no Estado de Pernambuco, 2000.
- Nº 04 - Mapa de Insumos Minerais para Agricultura e Áreas Potenciais nos Estados de Pernambuco, Alagoas, Paraíba e Rio Grande do Norte, 2001.
- Nº 05 - Estudo dos Níveis de Necessidade de Calcário nos Estados de Pernambuco, Alagoas, Paraíba e Rio Grande do Norte, 2001.
- Nº 06 - Síntese das Necessidades de Calcário para os Solos dos Estados da Bahia e Sergipe, 2001.
- Nº 07 - Mapa de Insumos Minerais para Agricultura e Áreas Potenciais de Rondônia, 2001.
- Nº 08 - Mapas de Insumos Minerais para Agricultura nos Estados de Amazonas e Roraima, 2001.
- Nº 09 - Mapa-Síntese de Jazimentos Minerais Carbonatados dos Estados da Bahia e Sergipe, 2001.
- Nº 10 - Insumos Minerais para Agricultura e Áreas Potenciais nos Estados do Pará e Amapá, 2001.
- Nº 11 - Síntese dos Jazimentos, Áreas Potenciais e Mercado de Insumos Minerais para Agricultura no Estado da Bahia, 2001.
- Nº 12 - Avaliação de Rochas Calcárias e Fosfatadas para Insumos Agrícolas do Estado de Mato Grosso, 2008.
- Nº 13 - Projeto Fosfato Brasil – Parte I, Salvador, 2011.
- Nº 14 - Projeto Fosfato Brasil – Estado de Mato Grosso – Áreas Araras/Serra do Caeté e Planalto da Serra, 2011.
- Nº 15 - Projeto Mineralizações Associadas à Plataforma Bambuí no Sudeste do Estado do Tocantins (TO) – Goiânia, 2016.
- Nº 16 – Rochas Carbonáticas do Estado de Rondônia, Porto Velho, 2015.
- Nº 17 – Projeto Fosfato Brasil – Parte II, Salvador, 2016.
- Nº 18 – Geoquímica Orientativa para Pesquisa de Fosfato no Brasil, Salvador, 2016.
- Nº 19 – Projeto Agrominerais da Região de Irecê -Jaguarari, Salvador, 2016.
- Nº 20 – Avaliação do Potencial do Fosfato no Brasil – Fase III - Bacia dos Parecis, Porto Velho, 2017.
- Nº 21 – Avaliação do Potencial do Fosfato no Brasil – Fase III: Bacia Sergipe-Alagoas, Sub-bacia Sergipe, Recife, 2017.
- Nº 22 – Avaliação do Potencial do Fosfato no Brasil – Fase III: Centro-leste de Santa Catarina, Salvador, 2018.
- Nº 23 – Avaliação do Potencial do Potássio no Brasil: Bacia do Amazonas, setor centro-oeste, Estados do Amazonas e Pará, Manaus, 2020.
- Nº 24 – Investigação de Anomalias Geofísicas no Escudo Sul-Rio-Grandense com Enfoque em Insumos Agrícolas, Porto Alegre, 2020.
- Nº 25 – Avaliação do Potencial do Fosfato no Brasil: Borda Norte da Bacia do Amazonas, região de Monte Alegre e Monte Dourado, Estado do Pará, Belém, 2020.
- Nº 26 – Agrominerais do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021

## **SÉRIE PEDRAS PRECIOSAS**

- Nº 01 - Mapa Gemológico da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, 1997.
- Nº 02 - Mapa Gemológico da Região Lajeado/Soledade/Salto do Jacuí - Rio Grande do Sul, 1998
- Nº 03 - Mapa Gemológico da Região de Ametista do Sul - Rio Grande do Sul, 1998.
- Nº 04 - Recursos Gemológicos dos Estados do Piauí e Maranhão, 1998.
- Nº 05 - Mapa Gemológico do Estado do Rio Grande do Sul, 2000.
- Nº 06 - Mapa Gemológico do Estado de Santa Catarina, 2000.
- Nº 07 - Aspectos da Geologia dos Pólos Diamantíferos de Rondônia e Mato Grosso – O Fórum de Juína – Projeto Diamante, Goiânia, 2010.
- Nº 08 - Projeto Avaliação dos Depósitos de Opalas de Pedro II – Estado do Piauí, Teresina, 2015.
- Nº 09 - Aluviões Diamantíferos da Foz dos Rios Jequitinhonha e Pardo - Fase I – Estado da Bahia, Salvador, 2016.
- Nº 10 - Áreas Kimberlíticas e Diamantíferas do Estado de Minas Gerais, Brasília, 2017
- Nº 11 - Áreas Kimberlíticas e Diamantíferas do Estado de Rondônia, Brasília, 2017
- Nº 12 - Áreas Kimberlíticas e Diamantíferas do Estado do Mato Grosso, Brasília, 2017
- Nº 13 - Áreas Kimberlíticas e Diamantíferas do Estado da Bahia, Brasília, 2017

## **SÉRIE OPORTUNIDADES MINERAIS – EXAME ATUALIZADO DE PROJETO**

- Nº 01 - Níquel de Santa Fé - Estado de Goiás, 2000.
-

- Nº 02 - Níquel do Morro do Engenho - Estado de Goiás, 2000.  
Nº 03 - Cobre de Bom Jardim - Estado de Goiás, 2000.  
Nº 04 - Ouro no Vale do Ribeira - Estado de São Paulo, 1996.  
Nº 05 - Chumbo de Nova Redenção - Estado da Bahia, 2001.  
Nº 06 - Turfa de Caçapava - Estado de São Paulo, 1996.  
Nº 08 - Ouro de Natividade - Estado do Tocantins, 2000.  
Nº 09 - Gipsita do Rio Cupari - Estado do Pará, 2001.  
Nº 10 - Zinco, Chumbo e Cobre de Palmeirópolis - Estado de Tocantins, 2000.  
Nº 11 - Fosfato de Miriri - Estados de Pernambuco e Paraíba, 2001.  
Nº 12 - Turfa da Região de Itapuã - Estado do Rio Grande do Sul, 1998.  
Nº 13 - Turfa de Águas Claras - Estado do Rio Grande do Sul, 1998.  
Nº 14 - Turfa nos Estados de Alagoas, Paraíba e Rio Grande do Norte, 2001.  
Nº 15 - Nióbio de Uaupés - Estado do Amazonas, 1997.  
Nº 16 - Diamante do Rio Maú - Estado da Roraima, 1997.  
Nº 18 - Turfa de Santo Amaro das Brotas - Estado de Sergipe, 1997.  
Nº 19 - Diamante de Santo Inácio - Estado da Bahia, 2001.  
Nº 21 - Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, 1997.  
Nº 22 - Coal in the States of Rio Grande do Sul and Santa Catarina, 1999.  
Nº 23 - Kaolin Exploration in the Capim River Region - State of Pará - Executive Summary, 2000.  
Nº 24 - Turfa de São José dos Campos - Estado de São Paulo, 2002.  
Nº 25 - Lead in Nova Redenção - Bahia State, Brazil, 2001.  
Nº 26 – Projeto Reavaliação do Patrimônio Mineral, Área Polimetálicos de Palmeirópolis, Estado do Tocantins, Brasília, 2020.  
Nº 27 – Projeto Reavaliação do Patrimônio Mineral, Área Carvão Sul Catarinense, Estado de Santa Catarina, Brasília, 2021.  
Nº 28 – Projeto Reavaliação do Patrimônio Mineral, Área Fosfato de Miriri, Estado de Pernambuco e Paraíba, Brasília, 2021.  
Nº 29 – Projeto Reavaliação do Patrimônio Mineral, Área Carvão Iruí-Butiá, Estado do Rio Grande do Sul, Brasília, 2021.  
Nº 30 – Projeto Reavaliação do Patrimônio Mineral, Área Caulim do Rio Capim, Estado do Pará, Brasília, 2021.

### **SÉRIE DIVERSOS**

- Nº 01 - Informe de Recursos Minerais - Diretrizes e Especificações - Rio de Janeiro, 1997.  
Nº 02 - Argilas Nobres e Zeolitas na Bacia do Parnaíba - Belém, 1997.  
Nº 03 - Rochas Ornamentais de Pernambuco - Folha Belém do São Francisco - Escala 1:250.000 - Recife, 2000.  
Nº 04 - Substâncias Minerais para Construção Civil na Região Metropolitana de Salvador e Adjacências - Salvador, 2001.  
Nº 05 – Terras Indígenas do Noroeste do Amazonas: Geologia, Geoquímica e Cadastramento Mineral na região do Tunuí-Caparro, Estado do Amazonas, Manaus, 2020

### **SÉRIE RECURSOS MINERAIS MARINHOS**

- Nº 01 – Potencialidade dos Granulados Marinhos da Plataforma Continental Leste do Ceará – Recife, 2007.

### **SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS**

- Nº 01 – Projeto Materiais de Construção na Área Manacapuru-Iranduba-Manaus-Careiro (Domínio Baixo Solimões) – Manaus, 2007.  
Nº 02 – Materiais de Construção Civil na região Metropolitana de Salvador – Salvador, 2008.  
Nº 03 – Projeto Materiais de Construção no Domínio Médio Amazonas – Manaus, 2008.  
Nº 04 – Projeto Rochas Ornamentais de Roraima – Manaus, 2009.  
Nº 05 – Projeto Argilas da Bacia Pimenta Bueno – Porto Velho, 2010.  
Nº 06 – Projeto Quartzo Industrial Dueré-Cristalândia – Goiânia, 2010.  
Nº 07 – Materiais de Construção Civil na região Metropolitana de Aracaju – Salvador, 2011.  
Nº 08 – Rochas Ornamentais no Noroeste do Estado do Espírito Santo – Rio de Janeiro, 2012.
-

- Nº 09 – Projeto Insumos Minerais para a Construção Civil na Região Metropolitana do Recife – Recife, 2012.
- Nº 10 – Materiais de Construção Civil da Folha Porto Velho – Porto Velho, 2013.
- Nº 11 – Polo Cerâmico de Santa Gertrudes – São Paulo, 2014.
- Nº 12 – Projeto Materiais de Construção Civil na Região Metropolitana de Natal – Natal, 2015.
- Nº 13 – Materiais de Construção Civil para Vitória da Conquista, Itabuna-Ilhéus e Feira de Santana – Salvador, 2015.
- Nº 14 – Projeto Materiais de Construção da Região de Marabá e Eldorado dos Carajás – Belém, 2015.
- Nº 15 – Panorama do Setor de Rochas Ornamentais do Estado de Rondônia – Porto Velho, 2015
- Nº 16 – Projeto Materiais de Construção da Região Metropolitana de Goiânia – Goiânia, 2015
- Nº 17 – Projeto Materiais de Construção da Região Metropolitana de Porto Alegre – Porto Alegre, 2016
- Nº 18 – Projeto Materiais de Construção da Região Metropolitana de Fortaleza – Fortaleza, 2016
- Nº 19 – Projeto Materiais de Construção Civil da Região da Grande Florianópolis – Porto Alegre, 2016
- Nº 20 – Projeto materiais de construção da região de Macapá - Estado do Amapá – Belém, 2016.
- Nº 21 – Projeto Materiais De Construção da Região Metropolitana de Curitiba - Estado do Paraná, 2016.
- Nº 22 – Projeto Materiais de Construção da Região Metropolitana de São Luís e Entorno - Estado do Maranhão, 2017.
- Nº 23 – Panorama do Segmento de Rochas Ornamentais do Estado da Bahia, Salvador, 2019
- Nº 24 – Materiais de Construção da Região Metropolitana de São Paulo - Estado de São Paulo, São Paulo, 2019.
- Nº 25 – Gipsita no sudoeste da Bacia sedimentar do Araripe - Estado de Pernambuco, Recife, 2019.
- Nº 26 – Projeto Materiais de Construção da Região Metropolitana de Belo Horizonte - Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- Nº 27 – Rochas Ornamentais do Estado do Rio Grande do Norte: Mapa de Potencialidades, Natal, 2020.
- Nº 28 – Materiais de Construção da Região Metropolitana de Palmas - Estado do Tocantins, Goiânia, 2020.
- Nº 29 – Estudos dos granitoides da região Nordeste do Pará para produção de brita, Belém, 2020.
- Nº 30 – Materiais de Construção da Região de Capitão Poço-Ourém - Estado do Pará, Belém, 2020.
- Nº 31 - Calcários da Bahia: Faixas Rio Pardo e Orolândia-Campo Formoso, Salvador, 2021

#### **SÉRIE METAIS - INFORMES GERAIS**

- Nº 01 – Projeto BANEO – Bacia do Camaquã – Metalogenia das Bacias Neoproterozóico-eopaleozóicas do Sul do Brasil, Porto Alegre, 2008
- Nº 02 – Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu Entorno - MG – Rio de Janeiro, 2014.
- Nº 03 – Projeto BANEO – Bacias do Itajaí, de Campo Alegre e Corupá – Metalogenia das Bacias Neoproterozoico-eopaleozoicas do Sul do Brasil, Porto Alegre, 2015

#### **SÉRIE PROVÍNCIAS MINERAIS DO BRASIL**

- Nº 01 – Áreas de Relevante Interesse Mineral - ARIM, Brasília, 2015
- Nº 02 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Área Tróia-Pedra Branca, Estado do Ceará, Fortaleza, 2015
- Nº 03 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Área Sudeste do Tapajós, Estado do Pará, Brasília, 2015.
- Nº 04 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Província Aurífera Juruena-Teles Pires-Aripuanã – Geologia e Recursos Minerais da Folha Ilha Porto Escondido – SC.21-V-C-III, Brasília, 2015.
- Nº 05 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Distrito Zinífero de Vazante – MG, Brasília, 2015.
- Nº 06 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Rochas Alcalinas da Porção Meridional do Cinturão Ribeira. Estados de São Paulo e Paraná, Brasília, 2015.
- Nº 07 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Área Sudeste de Rondônia, Brasília, 2016.
- Nº 08 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Área Seridó-Leste, extremo nordeste da Província Borborema (RN-PB), Brasília, 2016.
- Nº 09 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Porção sul da Bacia do Paraná, RS, 2017
- Nº 10 – Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Área Eldorado do Juma, Estado do Amazonas, AM, 2019
- Nº 11 – Áreas de Relevante Interesse Mineral: Cinturão Gurupi, Estados do Pará e Maranhão, Brasília, 2017.
- Nº 12 – Áreas de relevante interesse mineral: Reserva Nacional do Cobre e Associados, Estados do Pará e Amapá, Belém, 2017.
- Nº 13 – Áreas de Relevante Interesse Mineral – Vale do Ribeira: Mineralizações Polimetálicas (Pb, Ag, Zn, Cu e Au – “Tipo Painéis”) em zonas de cisalhamento Rúptil, Cinturão Ribeira Meridional, SP-PR, São Paulo, 2017.
-

- Nº 14 – Área de Relevante Interesse Mineral - ARIM: Distrito Mineral de Paracatu-Unai (Zn-Pb-Cu), MG, 2018
- Nº 15 – Área de Relevante Interesse Mineral Integração Geológica-Geofísica e Recursos Minerais do Cráton Luis Alves, RS, 2018.
- Nº 16 – Áreas de Relevante Interesse Mineral - Província Mineral de Carajás, PA: Estratigrafia e análise do Minério de Mn de Carajás - áreas Azul, Sereno, Buritirama e Antônio Vicente, PA, 2018.
- Nº 17 – Áreas de Relevante Interesse Mineral Troia-Pedra Branca - Geologia e mineralização aurífera da sequência metavulcanossedimentar da Serra das Pipocas, Maciço de Troia, Ceará, Estado do Ceará, CE, 2018
- Nº 18 – Áreas de Relevante Interesse Mineral – Reavaliação da Província Estanífera de Rondônia, RO, 2019.
- Nº 19 – Áreas de relevante interesse mineral – Evolução Crustal e Metalogenia da Faixa Nova Brasilândia, RO, 2019.
- Nº 20 – Áreas de Relevante Interesse Mineral - Batólito Pelotas–Terreno Tijucas, Estado do Rio Grande do Sul, RS, 2019.
- Nº 21 – Áreas de Relevante Interesse Mineral – Vale do Ribeira: mineralizações polimetálicas (Pb-Zn-Ag-Cu-Ba) associadas a Formação Perau, Cinturão Ribeira Meridional, Estado do Paraná, São Paulo, 2019.
- Nº 22 – Áreas de relevante interesse mineral – Evolução crustal e metalogenia da Província Mineral Juruena–Teles-Pires, MT, Goiânia, 2019.
- Nº 23 – Áreas de relevante interesse mineral – Projeto evolução crustal e metalogenia da Faixa Brasília setor centro-norte, GO-TO, Goiânia, 2019
- Nº 24 – Avaliação do Potencial Mineral do NW do Ceará, CE, Fortaleza, 2019.
- Nº 25 – Avaliação do Potencial Mineral das faixas Marginais da borda NW do Craton do São Francisco (Área Riacho do Pontal), PI, Teresina, 2019.
- Nº 26 – Avaliação do Potencial Mineral das faixas Marginais da borda NW do Craton do São Francisco (Área Rio Preto), PI, Teresina, 2019.
- Nº 27 – Áreas de Relevante Interesse Mineral - Avaliação do Potencial Mineral do Vale do Ribeira (Área Castro), SP, São Paulo, 2019.
- Nº 28 – Áreas de Relevante Interesse Mineral - Evolução crustal e Metalogenia da região de Aripuanã, MT, Goiânia, 2020.
- Nº 29 – Modelo Prospectivo para Ametista e Água na Fronteira Sudoeste do Rio Grande do Sul, RS, Porto Alegre, 2020.
- Nº 30 – Áreas de Relevante Interesse Mineral - Reavaliação das sequências metavulcanossedimentares a Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero – Área de Nazareno, Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- Nº 31 - Áreas de Relevante Interesse Mineral – Integração Geológica e Avaliação do Potencial Metalogenético da Serra de Jacobina e dos Greenstone Belt Mundo Novo, Estado da Bahia, Salvador, 2021
- Nº 32 – Áreas de Relevante Interesse Mineral – Integração Geológica e Avaliação do Potencial Metalogenético das Sequências Metavulcanossedimentares tipo Greenstone Belts e/ou similares da região de Remanso-Sobradinho , Estado da Bahia, Salvador, 2021

### **SÉRIE MINERAIS ESTRATÉGICOS**

- Nº 01 – Diretrizes para Avaliação do Potencial do Potássio, Fosfato, Terras Raras e Lítio no Brasil, Brasília, 2015.
- Nº 02 – Avaliação do Potencial de Terras Raras no Brasil, Brasília, 2015.
- Nº 03 – Projeto Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil – Área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais, Brasília, 2016.
- Nº 04 – Projeto Avaliação do Potencial de Terras Raras No Brasil - Área Morro dos Seis Lagos, Noroeste do Amazonas, Brasília, 2019.
- Nº 05 – Projeto Avaliação do Potencial da Grafita no Brasil – Fase I, São Paulo, 2020.

### **SÉRIE GEOQUÍMICA PROSPECTIVA**

- Nº 01 – Informe Geoquímico Bacia do Araripe, Estados de Pernambuco, Piauí e Ceará, Recife, 2018.
- Nº 02 – Informe Geoquímico das Folhas Quixadá-Itapiúna, Estado do Ceará, Fortaleza, 2020.

### **SÉRIE MAPEAMENTO GEOQUÍMICO**

- Nº 01 – Levantamento geoquímico do Escudo do Rio Grande do Sul, Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
-

# O SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM E OS OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ODS

Em setembro de 2015 líderes mundiais reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, e formularam um conjunto de objetivos e metas universais com intuito de garantir o desenvolvimento sustentável nas dimensões econômica, social e ambiental. Esta ação resultou na *Agenda 2030*, a qual contém um conjunto de *17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS*.

A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade. Busca fortalecer a paz universal, e considera que a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões é o maior desafio global, e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável.

Os 17 ODS incluem uma ambiciosa lista 169 metas para todos os países e todas as partes interessadas, atuando em parceria colaborativa, a serem cumpridas até 2030.



O **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** atua em diversas áreas intrínsecas às Geociências, que podem ser agrupadas em quatro grandes linhas de atuação:

- Geologia
- Recursos Minerais;
- Hidrologia; e
- Gestão Territorial.

Todas as áreas de atuação do SGB-CPRM, sejam nas áreas das Geociências ou nos serviços compartilhados, ou ainda em seus programas internos, devem ter conexão com os ODS, evidenciando o comprometimento de nossa instituição com a sustentabilidade, com a humanidade e com o futuro do planeta.

A tabela a seguir relaciona as áreas de atuação do SGB-CPRM com os ODS.

# Áreas de atuação do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS

## ÁREA DE ATUAÇÃO GEOCIÊNCIAS

### LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS



### LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS



### AValiação DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL



### LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS MARINHOS



### LEVANTAMENTOS GEOQUÍMICOS



### LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS



### SISTEMAS DE ALERTA HIDROLÓGICO



### AGROGEOLOGIA



### LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS



### RISCO GEOLÓGICO



### GEODIVERSIDADE



### PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOPARQUES



### ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO



### GEOLOGIA MÉDICA



### RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO



## ÁREA DE ATUAÇÃO SERVIÇOS COMPARTILHADOS

### GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO



### TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO



### LABORATÓRIO DE ANÁLISE MINERAIS



### MUSEU DE CIÊNCIAS DA TERRA



### PALEONTOLOGIA



### PARCERIAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS



### REDE DE BIBLIOTECAS



### REDE DE LITOTECAS



### GOVERNANÇA



## ÁREA DE ATUAÇÃO PROGRAMAS INTERNOS

### SUSTENTABILIDADE



### PRÓ-EQUIDADE



### COMITÊ DE ÉTICA





## PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

### INFORME DE RECURSOS MINERAIS

#### Série Insumos Minerais para Agricultura, nº 26

### AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL: GRUPO SERRA GERAL DA BACIA DO PARANÁ NO RIO GRANDE DO SUL

O produto Informe de Recurso Minerais, parte integrante do Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral, objetiva sistematizar e divulgar os resultados das atividades e projetos desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, nos campos da geologia econômica, metalogênese, prospecção, pesquisa e economia mineral. Tais resultados podem ser apresentados sob a forma de estudos, artigos, relatórios e mapas.

Nesse sentido, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM desenvolveu o Projeto Avaliação do Potencial Agromineral do Brasil: Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul, que tem como objetivo a caracterização do potencial agromineral da parte sul rio-grandense da província de basaltos continentais Paraná-Etendeka, de idade eocretácea. Os litotipos estudados compreendem rochas toleíticas vulcânicas e subvulcânicas como basaltos, andesitos basálticos e andesitos, com rochas ácidas e alcalinas subordinadas (dacitos, traquitos, riodacitos e riolitos).

O presente informe reúne um banco de dados litoquímicos que totaliza 246 amostras distribuídas ao longo das diversas regiões geográficas da metade norte do estado, designadas como blocos Litoral, Região Central, Fronteira Oeste e Região Norte. As rochas são caracterizadas enquanto fontes potenciais para remineralizadores de solos, a partir dos critérios que a legislação de fertilizantes estabelece para esta categoria de insumos; ou para destinação a fertilizantes simples fontes de cálcio, magnésio ou potássio, e do elemento benéfico silício. Basaltos amigdaloides com cavidades mineralizadas a zeólitas e brechas com cimento calcítico foram apontados como fontes potenciais de condicionadores de solos, sendo empregados os métodos de espectroscopia de reflectância e difratometria de raios X para caracterização de minerais do grupo das zeólitas. A grande continuidade lateral dos derrames vulcânicos, assim como sua espessura, apontam para jazidas de insumos disponíveis em todos os blocos, com destaque do potencial de basaltos amigdaloides a zeólitas nos blocos litoral e central.

Esta publicação busca apoiar a formulação de políticas públicas, contribuindo para atrair investimentos no setor mineral, e que seus efeitos possam resultar na geração de empregos, renda e desenvolvimento social à luz da sustentabilidade e respeito ao meio ambiente.

Este Informe de Recursos Minerais e a base de dados estão disponíveis para *download* no portal: [www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)

#### Sede

Setor Bancário Norte - SBN - Quadra 02,  
Asa Norte Bloco H - 5º andar - Edifício Central Brasília  
Brasília - DF - CEP: 70040-904  
Tel: 61 2108-8400

#### Escritório Rio de Janeiro

Av Pasteur, 404 - Urca  
Rio de Janeiro - RJ Cep: 22290-255  
Tel: 21 2295-5337 - 21 2295-5382

#### Diretoria de Geologia e Recursos Minerais

Tel: 21 2546-0212 - 61 3223-1166

#### Departamento de Geologia

Tel: 91 3182-1326

#### Departamento de Recursos Minerais

Tel: 21 2295-4992

#### Diretoria de Infraestrutura Geocientífica

Tel: 21 2295-5837 - 61 2108-8457

#### Superintendência de Porto Alegre

Rua Banco da Província, 105 - Santa Teresa  
Porto Alegre - RS - CEP: 90840-030  
Tel.: 51 3406-7300

#### Assessoria de Comunicação

Tel: 61 2108-8468  
E-mail: [asscomdf@cprm.gov.br](mailto:asscomdf@cprm.gov.br)

#### Divisão de Marketing e Divulgação

Tel: 31 3878-0333  
E-mail: [marketing@cprm.gov.br](mailto:marketing@cprm.gov.br)

#### Ouvidoria

Tel: 21 2541-6344  
E-mail: [ouvidoria@cprm.gov.br](mailto:ouvidoria@cprm.gov.br)

#### Serviço de Atendimento ao Usuário – SEUS

Tel: 21 2295-5997  
E-mail: [seus@cprm.gov.br](mailto:seus@cprm.gov.br)