

ROCHAGEM E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO: MINERAÇÃO, AGRICULTURA E DESENVOLVIMENTO NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA



ANTONIO AUGUSTO PEREIRA DE SOUSA
(Organizador)





Universidade Estadual da Paraíba

Prof.^a Célia Regina Diniz | Reitora

Prof.^a Ivonildes da Silva Fonseca | Vice-Reitora



Editora da Universidade Estadual da Paraíba

Alberto Soares de Melo | Diretor

Conselho Editorial

Alessandra Ximenes da Silva (UEPB)

Antonio Roberto Faustino da Costa (UEPB)

Cidoval Morais de Sousa (UEPB)

José Etham de Lucena Barbosa (UEPB)

José Luciano Albino Barbosa (UEPB)

Melânia Nóbrega Pereira de Farias (UEPB)

Patrícia Cristina de Aragão (UEPB)

Expediente EDUEPB

Design Gráfico e Editoração

Erick Ferreira Cabral

Jefferson Ricardo Lima A. Nunes

Leonardo Ramos Araujo

Assessoria Técnica

Thaise Cabral Arruda

Assessorias

Antonio de Brito Freire

Carlos Alberto de Araujo Nacre

Danielle Correia Gomes

Elizete Amaral de Medeiros

Efigênio Moura



Editora indexada no SciELO desde 2012



Editora filiada a ABEU

EDITORIA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

Complexo Adm. Redentorista - Av. Dr. Francisco Pinto, nº 317, Bairro Universitário.
CEP: 58429-350. Campina Grande – PB.

ANTONIO AUGUSTO PEREIRA DE SOUSA
(Organizador)

ROCHAGEM E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO: MINERAÇÃO, AGRICULTURA E DESENVOLVIMENTO NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA



Campina Grande - PB

2025

CONSELHO EDITORIAL

Antonio José Ferreira Gadelha - IFPB
Clarice Oliveira da Rocha - IFPB
Edilane Laranjeira Pimentel – UEPB
Gelmires de Araújo Neves – UFCG
Luciana de Figueiredo Lopes Lucena – UFRN
Mauricio Boscolo – UNESP
Maristela Alves da Silva – UEPB
Raphael Moreira Beirigo – UFPB
Sara Regina Ribeiro Carneiro de Barros – UEPB
Sérgio de Farias Lopes – UEPB
William de Paiva – UEPB

Depósito legal na Câmara Brasileira do Livro - CDL

R672 Rochagem e Sustentabilidade no Semiárido [recurso eletrônico] :
Mineração, Agricultura e desenvolvimento na Província
Pegmatítica da Borborema / organização e apresentação de
Antonio Augusto Pereira de Sousa ; prefácio de Cassiano
Pascoal Pereira Neto ; posfácio de Reinaldo Dantas
Sampaio. – Campina Grande : EDUEPB, 2025.
298 p. : il. color. ; 15 x 21 cm.

ISBN: 978-65-268-0087-4 (Impresso)
ISBN: 978-65-268-0086-7 (8.990 KB - PDF)

1. Mineração. 2. Agricultura. 3. Semiárido Brasileiro. 4. Agricultura Familiar. 5. Sustentabilidade Socioambiental. I. Sousa, Antonio Augusto Pereira de. II. Título.

21. ed. CDD 622

Ficha catalográfica elaborada por Fernanda Mirelle de Almeida Silva – CRB-15/483

Copyright © **EDUEPB**

A reprodução não-autorizada desta publicação, por qualquer meio, seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9.610/98.

Dedico este trabalho aos mineradores, garimpeiros, agricultores e empresários dos setores da mineração e do agronegócio, cuja persistência, resiliência e incansável motivação contribuem de forma decisiva para o desenvolvimento do semiárido brasileiro.

De forma especial, dedico à minha esposa e aos meus quatro filhos — Felipe, Fabrício, Marianna e Marinna — pelo amor, incentivo e apoio constantes, que foram fundamentais ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

O que, a princípio, se apresentou como um grande desafio — conquistar a adesão de profissionais de diferentes áreas do conhecimento — transformou-se, com surpreendente naturalidade, em um trabalho coletivo pautado pelo comprometimento mútuo, pela colaboração genuína e pela humildade intelectual de todos os envolvidos. Reunimos um grupo interdisciplinar e engajado, composto por pesquisadores, professores, doutorandos, mestrandos e graduandos, oriundos de campos diversos como: Agronomia, Biologia, Geologia, Geografia, Ciência da Computação, Ciência do Solo, Engenharia e Química — todos unidos pelo propósito comum de contribuir com novos saberes para o desenvolvimento sustentável do Semiárido Brasileiro.

A cada um dos autores que aceitaram o convite para integrar esta obra, manifesto minha mais sincera admiração e respeito, reconhecendo o valor inestimável de suas contribuições para o fortalecimento do conhecimento científico e tecnológico voltado à nossa realidade regional.

É com grande honra que registramos também a participação especial de importantes lideranças, cujas reflexões enriquecem significativamente este livro: o empresário Cassiano Pascoal Pereira Neto, Presidente da Federação das Indústrias do Estado da Paraíba (FIEPB), autor do prefácio; e o economista Reinaldo Dantas Sampaio, Presidente da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (Abirochas) autor do posfácio. Suas contribuições nos brindam com visões valiosas oriundas do setor produtivo, conferindo

ainda mais legitimidade e relevância à presente publicação. Nossa mais profunda gratidão!

Por fim, estendo meus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, através do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Financiamento Ciência e Tecnologia, o MCTI/FNDCT/CT- Energ e ao MCTI/FNDCT/ CT- Mineral, pelo imprescindível apoio institucional e financeiro à realização do projeto intitulado “Desenvolvimento tecnológico para rejeitos de rochas ornamentais: Estudo de viabilidade da incorporação dos rejeitos finos de pegmatitos em correção de solo agrícola”, aprovado na Chamada CNPq/CT-Mineral/CT-Energ Nº 27/2022 – PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais Estratégicos. Agradeço, igualmente, à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), pelo apoio contínuo por meio da concessão de bolsas de estudo, materiais e infraestrutura essenciais para a realização das pesquisas e ações de extensão que sustentam os temas tratados nesta obra.

A todos e a cada um, o meu sincero reconhecimento.

Antonio Augusto Pereira de Sousa

Organizador

“A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento”.

Frederick Herzberg

APRESENTAÇÃO

Este livro nasceu do reconhecimento ao trabalho incansável de inúmeros profissionais que se dedicam a estudar, pesquisar, investigar e questionar, com o objetivo de compreender, explorar e capacitar pessoas para interpretarem, de forma contínua, os valores do progresso social, econômico, ambiental e científico. Tudo isso dentro de um tema de importância crucial para o desenvolvimento da sociedade brasileira: a sustentabilidade e a competitividade das atividades primárias, como a mineração e a agricultura — setores que compõem uma das principais vantagens competitivas do Brasil no cenário econômico mundial.

A proposta editorial foi cuidadosamente estruturada em três partes, com o intuito de proporcionar uma compreensão abrangente e aprofundada do tema.

A **Parte I** – A Região do Pegmatito da Província Pegmatítica da Borborema trata dos múltiplos aspectos de uma área de grande relevância no Semiárido Brasileiro. São abordadas suas características geológicas, potencialidades e contribuições para o desenvolvimento regional.

A **Parte II** – Mineração e Agricultura Familiar no Semiárido Brasileiro reúne estudos que evidenciam a inter-relação entre mineração e agricultura familiar. Esses temas são fundamentais para promover a sustentabilidade e melhorar a qualidade de vida no Nordeste brasileiro, demonstrando o papel transformador dessas atividades quando conduzidas de forma integrada e responsável.

Na **Parte III** – Rochagem com Pegmatitos do Semiárido Brasileiro, são apresentadas pesquisas sobre rotas tecnológicas voltadas à aplicação de rochagem e uso de remineralizadores oriundos dos pegmatitos da Província da Borborema. Essa seção também destaca

a atuação do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, núcleo ES, como parceiro relevante no avanço dessas tecnologias e um estudo para controle de eutrofização com minerais da Região do Pegmatito da Borborema.

O progresso alcançado no Brasil deve-se, em grande parte, ao esforço de instituições de fomento à pesquisa, como CNPq, CAPES, FINEP e fundações estaduais; centros de pesquisa como o CETEM, EMBRAPA e INSA; instituições de ensino superior, como UEPB, UFCG e UFPB; institutos técnicos como o IFPB; além de empresas, comunidades e entidades da sociedade civil. Todos esses atores têm papel essencial na continuidade e no fortalecimento das pesquisas sobre rochagem e remineralizadores.

Estudos voltados à agricultura familiar, ao Semiárido, à sustentabilidade socioambiental e à competitividade industrial são fundamentais para promover o desenvolvimento sustentável da mineração e da agricultura. A abordagem multidisciplinar e interinstitucional tem sido chave para superar os desafios que envolvem essas práticas, colocando-as como soluções estratégicas dentro da economia circular. Além disso, oferecem alternativas relevantes frente à escassez de recursos minerais, especialmente para arranjos produtivos locais como a agricultura familiar.

O livro "Rochagem e Sustentabilidade no Semiárido: Mineração, Agricultura e Desenvolvimento na Província Pegmatítica da Borborema" é fruto de dedicação, comprometimento e competência. Seus 16 capítulos reúnem informações essenciais para o fortalecimento do Brasil como referência nos setores de mineração e agronegócio. Esperamos que ele seja uma fonte útil e inspiradora para pesquisadores, estudantes, técnicos e formuladores de políticas públicas.

Boa leitura e até breve!

Antonio Augusto Pereira de Sousa

Organizador

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------|-----------|
| PREFÁCIO | 19 |
|-----------------------|-----------|

Empresário Cassiano Pascoal Pereira Neto

PARTE I

REGIÃO DO PEGMATITO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 | |
| PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA, NORDESTE DO BRASIL: SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA | 23 |

Dwight Rodrigues Soares

Wandenberga Bismarck Colaço Lima

Josenildo Isidro dos Santos Filho

Alinne Marianne Martins Araújo

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 2 | |
| PEGMATITOS DA PARAÍBA E DO RIO GRANDE DO NORTE: RICOS EM MINERAIS E GEMAS | 37 |

José Aderaldo de Ferreira Medeiros

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 3 | |
| ECOFISIOLOGIA DA REGIÃO DO PEGMATITO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA | 59 |

Agda Malany Forte de Oliveira

Eulália Margarethe da Costa Melo

Guilherme Felix Dias

Priscylla Marques de Oliveira Viana

Semako Ibrahim Bonou

Alberto Soares de Melo

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 4 | |
| HIDROLOGIA DO PEGMATITO ALTO DO PATRIMÔNIO, PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA..... | 75 |
| <i>Celso Augusto Guimarães Santos</i> | |
| <i>Reginaldo Moura Brasil Neto</i> | |
| <i>Raul Souza Muniz</i> | |
| <i>Richarde Marques da Silva</i> | |

PARTE II

**MINERAÇÃO E AGRICULTURA FAMILIAR NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 5 | |
| ESTUDOS SOBRE MINÉRIOS NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA | 95 |
| <i>Ianna Maria Sodré Ferreira de Sousa</i> | |
| CAPÍTULO 6 | |
| ESTOQUES REMANESCENTES DA MINERAÇÃO DA REGIÃO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA..... | 115 |
| <i>Wandenberg Bismarck Colaço Lima</i> | |
| <i>Dwight Rodrigues Soares</i> | |
| <i>Alinne Marianne Martins Araújo</i> | |
| <i>Laércio Leal dos Santos</i> | |
| <i>José Lion Oliveira Julião</i> | |

CAPÍTULO 7
**AGRICULTURA FAMILIAR E ROCHAGEM COMO
INSTRUMENTOS DE SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO 129**

*Daiana Caroline Refati
Rodrigo Santana Macedo
Maria Robeilsa dos Santos Silva
Emanuel da Costa Cavalcante
Marianna Sodré Ferreira de Sousa
Jacqueline da Rocha Cavalcanti
Joice Kelly Santos da Silva
Antonio Augusto Pereira de Sousa*

CAPÍTULO 8
**A FITOTECNIA NA AGRICULTURA FAMILIAR NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO 141**

*Marília de Macêdo Duarte Moraes
Antonio Augusto Pereira de Sousa
Rodrigo Santana Macedo
Cristiano dos Santos Sousa
Emanuel da Costa Cavalcante
Carlos Antônio Andrade da Silva
Vicente Victor Lima de Andrade
José Félix de Brito Neto*

CAPÍTULO 9
**FITOPATOLOGIA NA AGRICULTURA FAMILIAR NO
SEMIÁRIDO PARAIBANO 157**

*Elida Barbosa Corrêa
Amanda de Melo Gonçalves Gaião
Afonso Barbosa Júnior
Joelma Nayara Silva Xavier
Sayonara Medeiros Duarte
Maria Valdeane Caetano da Silva*

PARTE III

**ROCHAGEM COM PEGMATITOS DO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

CAPÍTULO 10

ROCHAGEM UTILIZANDO PEGMATITOS: ASPECTOS

ATUAIS **179**

*Marília de Macêdo Duarte Morais
Marianna Sodré Ferreira de Sousa
Lucas Cardoso Vidal de Negreiros
Kauê Pierry Santos Araújo
Antonio Augusto Pereira de Sousa*

CAPÍTULO 11

**CARACTERIZAÇÃO DE PEGMATITOS E XISTOS DA REGIÃO
DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA** **195**

*Hilda Camila Nascimento Nogueira
Maria Barbosa da Silva Cordeiro
Jamile Bezerra Leite dos Santos
Marianna Sodré Ferreira de Sousa
Antonio Augusto Pereira de Sousa*

CAPÍTULO 12

**SOLUBILIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA PARA LIBERAÇÃO
DE K E P DE XISTOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA
BORBOREMA** **219**

*Franklin Sales de Araújo
Élida Barbosa Corrêa
Rodrigo Santana Macedo
Vitória Sabrinna Azevedo Soares da Silva
Josely Dantas Fernandes
Cristiano dos Santos Sousa
Antonio Augusto Pereira de Sousa*

CAPÍTULO 13
**EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NA LIBERAÇÃO DE
NUTRIENTES DE PEGMATITOS E XISTOS DA PROVÍNCIA
PEGMATÍTICA DA BORBOREMA..... 233**

*Rodrigo Santana Macedo
Jamile Bezerra Leite dos Santos
Emanuel da Costa Cavalcante
José Felix de Brito Neto
Emily Vitória Gomes Moreira
Franklin Sales de Araújo
Cristiano dos Santos Sousa
Antonio Augusto Pereira de Sousa*

CAPÍTULO 14
**POTENCIAL AGRONÔMICO DE XISTOS DA PROVÍNCIA
PEGMATÍTICA DA BORBOREMA..... 247**

*Marconeide de Araújo Sobrinho
Rodrigo Santana Macedo
Antonio Augusto Pereira de Sousa
Maria Robeilsa dos Santos Silva
Franklin Sales de Araújo
Emanuel da Costa Cavalcante
Cristiano dos Santos Sousa
Laercio Leal dos Santos*

CAPÍTULO 15
**A CONTRIBUIÇÃO DO CENTRO DE TECNOLOGIA
MINERAL NAS PESQUISAS DE RESÍDUOS DE
ROCHAS ORNAMENTAIS COMO POTENCIAIS
REMINERALIZADORES DE SOLOS AGRÍCOLAS..... 259**

*Guilherme de Resende Camara
Leonardo Luiz Lyrio da Silveira*

CAPÍTULO 16
**ARGILAS E MINERAIS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA
DA BORBOREMA COMO ADSORVENTES DE FÓSFORO:
ALTERNATIVAS PROMISSORAS PARA O CONTROLE DA
EUTROFIZAÇÃO..... 273**

*José Etham de Lucena Barbosa
Ranielle Daiana dos Santos-Silva
Juliana dos Santos Severiano
Daniely de Lucena-Silva
Amanda Myrna de Meneses e Costa
Patrícia Silva Cruz*

POSFÁCIO..... 295
Economista Reinaldo Dantas Sampaio

PREFÁCIO

Vivemos um tempo em que o desenvolvimento das atividades produtivas, essenciais para o progresso da sociedade, exige dos empresários um compromisso cada vez maior com a inovação, a responsabilidade social e a sustentabilidade. Esses desafios, longe de serem obstáculos, têm impulsionado avanços significativos na gestão, nos processos técnicos e tecnológicos, sempre em busca de um equilíbrio que promova a melhoria da qualidade de vida da população.

É, portanto, com grande alegria e honra que escrevo este prefácio. Como empresário do setor mineral – atividade estratégica para o desenvolvimento do Brasil – e à frente de uma empresa familiar tradicional, com atuação desde 1982, tenho plena consciência da importância da inovação tecnológica como instrumento para mitigar os impactos dos estoques remanescentes da mineração. A pesquisa e o desenvolvimento de soluções ambientalmente responsáveis são, hoje, caminhos incontornáveis para garantir não apenas a competitividade do setor, mas também sua contribuição para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental do país.

Neste contexto, a obra *Rochagem e Sustentabilidade no Semiárido: Mineração, Agricultura e Desenvolvimento na Província Pegmatítica da Borborema*, surge como leitura essencial. Seus conteúdos oferecem uma visão crítica e abrangente sobre temas fundamentais à mineração sustentável, apresentando dados técnicos e conceitos relevantes para a mitigação de impactos sociais, ambientais e econômicos.

Parabenizo, portanto, todos os autores desta importante contribuição acadêmica, em especial o organizador Prof. Antonio Augusto, pelo compromisso com a sensibilização, motivação e geração de conhecimento. Esta obra reforça o papel estratégico

da articulação entre os diversos agentes da sociedade – instituições públicas, como órgãos de fiscalização e instituições de ensino e pesquisa, e o setor privado, representado pelas indústrias, comércios e serviços – para a construção de um modelo de desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

Campina Grande-PB, 30 de maio de 2025.

Empresário Cassiano Pascoal Pereira Neto

Presidente da Federação das Indústrias do Estado da Paraíba (FIEP) Presidente do Sindicato da Indústria de Extração de Minerais Não-Metálicos do Estado da Paraíba (Sindminerais/PB).

PARTE I

REGIÃO DO PEGMATITO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA



CAPÍTULO 1

PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA, NORDESTE DO BRASIL: SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA

Dwight Rodrigues Soares¹

Wandenberga Bismarck Colaço Lima²

Josenildo Isidro dos Santos Filho³

Alinne Marianne Martins Araújo⁴

Os pegmatitos graníticos, ou simplesmente pegmatitos, são rochas ígneas singulares, de pequenas dimensões, de granulometria extremamente grossa e texturas exóticas (London, 2015, Wise *et al.*, 2022). São constituídas essencialmente por quartzo, feldspatos e micas, com ocorrência disseminada em muitos países (Brasil, EUA, Rússia, Canadá, Austrália, Portugal, Espanha, Moçambique, entre outros). Entretanto a maioria dos corpos pegmatíticos é supostamente estéril. Os pegmatitos mineralizados normalmente apresentam grande diversidade de minerais acessórios (berilos, nióbio, tantalatos, minerais de lítio, fosfatos, cassiterita, turmalinas,

1 Doutor em Geociências pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Professor do Curso Técnico em Mineração - IFPB, Campus Campina Grande dwight.soares@ifpb.edu.br;

2 Doutor em Engenharia de Processos – UFCG. Professor do Curso Técnico em Mineração - IFPB, Campus Campina Grande, wandenberga.lima@ifpb.edu.br;

3 Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais - UFCG, Campus Campina Grande. josenildoisidro@gmail.com;

4 Doutoranda em Engenharia Ambiental e Sanitária - UEPB, Campus Campina Grande. alinne.marianne@gmail.com.

entre outros) de valor econômico, essenciais para a indústria. Os pegmatitos e seus exocontatos são hospedeiros de uma diversificada gama de minerais industriais e gemas diversas, algumas raras, de alto valor comercial.

Os pegmatitos são corpos tabulares, lenticulares, ramificados, bulbosos ou irregulares e geralmente são de pequenas dimensões, apresentando, na maioria das vezes, contatos bruscos com a rocha encaixante.

As rochas pegmatíticas se destacam como importantes fontes de Li, Be, Nb, Ta, Be, Cs, Rb, Sn, Sc, Ga, U, Th, Zr, ETR, entre outros (Balaram *et al.*, 2024). Esses elementos são essenciais para a indústria moderna, sendo essenciais na produção de baterias, supercondutores e ligas metálicas de alta performance, e mais recentemente, como elementos estratégicos para a transição energética e produção de energia verde (Lebrouhi *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2025).

De acordo com Simmons (2007), os pegmatitos podem ser classificados, quanto a sua estrutura interna, em simples (homogêneos), zonados (heterogêneos) e complexos (zonados, com áreas de alteração metassomática). Do ponto de vista econômico, esses dois últimos tipos são mais interessantes, devido sua mineralogia mais diversificada.

Černý (1991) classificou os pegmatitos enriquecidos em elementos raros em três famílias: NYF, LCT e mistos. Os pegmatitos da família NYF têm tendências de acumular nióbio (Nb), ítrio (Y) + ETR, flúor (F). Os pegmatitos LCT tendem a acumular os elementos lítio (Li), césio (Cs), tântalo (Ta). Os pegmatitos mistos são os que apresentam características mineralógicas e geoquímicas dos dois primeiros tipos: NYF + LCT. Essa classificação é notável, pois relaciona o nível de fracionamento geoquímico com a mineralização dos pegmatitos a nível local e regional.

Os pegmatitos são corpos pequenos (dezenas a centenas de metros de extensão) dificilmente justificando altos investimentos

por parte de empresas de mineração. Por isso, no Brasil, bem como em outras partes do mundo, os pegmatitos são trabalhados por garimpeiros.

Os pegmatitos são rochas extraordinárias que, devido a sua complexidade mineralógica, fornecem inúmeros insumos para a indústria, relacionados principalmente a minerais industriais e gemas. Constituem, a nível mundial, a principal fonte de tântalo (Ta), lítio (Li) e estanho (Sn), além de representarem importantes depósitos de Elementos de Terras Raras (ETR).

Com a crescente procura por lítio, a nível mundial, os pegmatitos passaram a ter uma importância estratégica, com a realização de projetos em vários países.

O estudo dos pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB) e sua importância econômica e estratégica estão embasados em dados bibliográficos, além de dados obtidos em visitas de campo a diversos corpos pegmatíticos da região, ao longo de anos de estudos.

METODOLOGIA

A importância econômica, abrangência e atualidade foram essenciais para a escolha do tema a ser abordado. Foram realizadas pesquisas bibliográficas em artigos científicos, teses e dissertações, além de resumos publicados em anais de eventos, entre outros, visando obter um embasamento científico sobre o tema abordado.

As pesquisas foram realizadas principalmente em bibliotecas de instituições de ensino (IFPB, UFPE, entre outros) e no banco digital de dados do Núcleo de Estudos de Pegmatitos (N-PEG), do IFPB, *Campus* Campina Grande, único do gênero no Brasil, atualmente, com mais de 6.400 publicações abordando pegmatitos graníticos. Procuram-se utilizar, dentro do possível, publicações clássicas e recentes, concentradas principalmente em artigos científicos

nacionais e estrangeiros. Nesse contexto, as palavras-chave necessárias para esse estudo são: pegmatitos graníticos, Província Pegmatítica da Borborema, importância econômica e estratégica.

Também foram utilizados dados de campo obtidos em visitas a pegmatitos da PPB, realizadas principalmente nos últimos 10 anos. Foram estudados e amostrados pegmatitos localizados em várias cidades. Podem ser citados os seguintes pegmatitos: Boqueirão, Capoeira e Quintos (Parelhas/RN), Alto do Giz e Amâncio (Equador/RN), Mirador (Carnaúba dos Dantas/RN), Patrimônio, Alto Feio e Serra Branca (Pedra Lavrada/PB), Alto Quixaba (Frei Martinho/PB). A amostragem, quando possível, foi realizada em todas as zonas dos pegmatitos, em quantidades variáveis e compatíveis (suficientes para análises químicas e contraprovas).

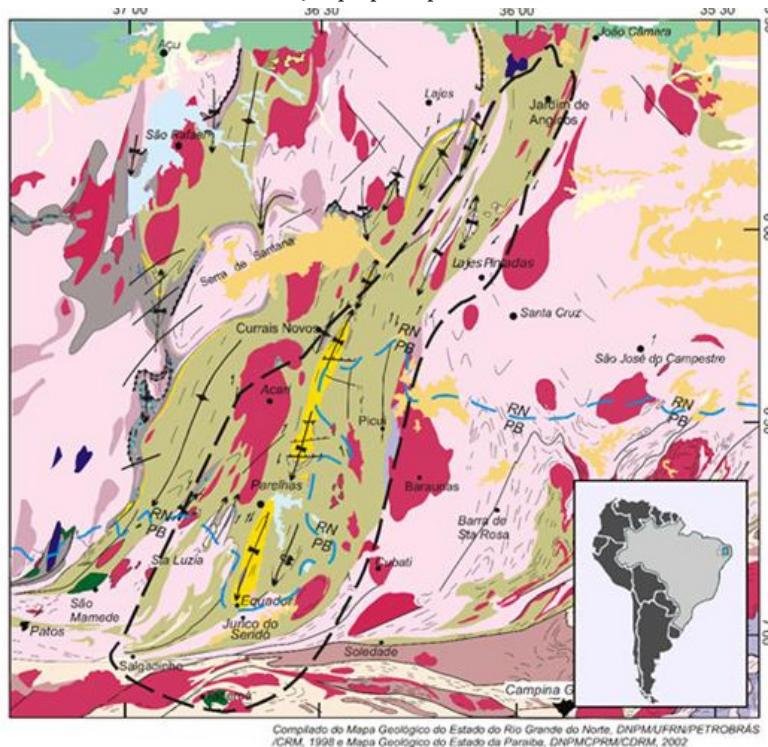
Os resultados obtidos proporcionaram publicações em periódicos nacionais e estrangeiros, além de resumos em anais de eventos, gerando inúmeras citações nas bases Web of Sciences, Scopus e Google Acadêmico.

Na redação do texto, procurou-se utilizar linguagem científica (clara e precisa) com uso de termos técnicos adequados ao tema abordado, adotando-se uma uniformidade na escrita e evitando-se ambiguidades.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB), alvo desse estudo, foi definida e delimitada pioneiramente por Scorza (1944), conforme Figura 1, a seguir. Soares (2004) redefiniu os limites da província a partir da descoberta de novos pegmatitos, englobando principalmente a região de São José da Batalha, Paraíba.

Figura 1 - Província Pegmatítica da Borborema em base geológica simplificada, com delimitação proposta por Soares (2004)



LEGENDA



Fonte: Os autores.

A PPB abrange os municípios norte-rio-grandenses de Acari, Equador, Parelhas, Carnaúba dos Dantas, Jardim de Angicos, São Tomé e Lajes Pintadas, além dos municípios paraibanos de Picuí, Pedra Lavrada, Frei Martinho, Nova Palmeira, Juazeirinho, Junco do Seridó, Salgadinho e Taperoá.

Para Beurlen *et al.* (2008), existem, na PPB, mais de 750 pegmatitos de elementos raros mineralizados, além de supostos corpos estéreis. Muitos desses corpos pegmatíticos foram pouco estudados, necessitando-se de estudos sistematizados abordando principalmente mineralogia, geoquímica e geocronologia.

Os pegmatitos da região são trabalhados, há décadas, por garimpeiros, de forma artesanal, sem nenhuma orientação técnica. Atualmente, com o advento das cooperativas de garimpeiros, houve uma melhora nas condições econômicas e sociais dos trabalhadores, com redução do comércio clandestino promovido por atravessadores. Também fornece equipamentos e apoio técnico, além de auxiliar na comercialização da produção (Dantas, 2017).

A geologia da Faixa Seridó, onde se localiza a PPB, é constituída basicamente por um conjunto de rochas supracrustais (Grupo Seridó), de idade Neoproterozoica, que repousa discordantemente sobre um embasamento Paleoproterozoico (Complexo Caicó) de composição gnáissica-migmatítica. O Grupo Seridó é constituído, da base para o topo, pelas Formações Jucurutu, Equador e Seridó. A Formação Jucurutu é constituída principalmente de paragnaisse com pouca biotita \pm muscovita \pm epidoto. A Formação Equador é constituída basicamente por muscovita-quartzitos com fácies arco-seanas e metaconglomeráticas. A Formação Seridó, unidade mais típica da Faixa Seridó, é constituída por granada-biotita xistos como litologia dominante, intercalados por muscovita-quartzitos (Jardim de Sá, 1994). Nesta formação, estão inseridos cerca de 80% dos pegmatitos mineralizados da PPB (Da Silva *et al.*, 1995).

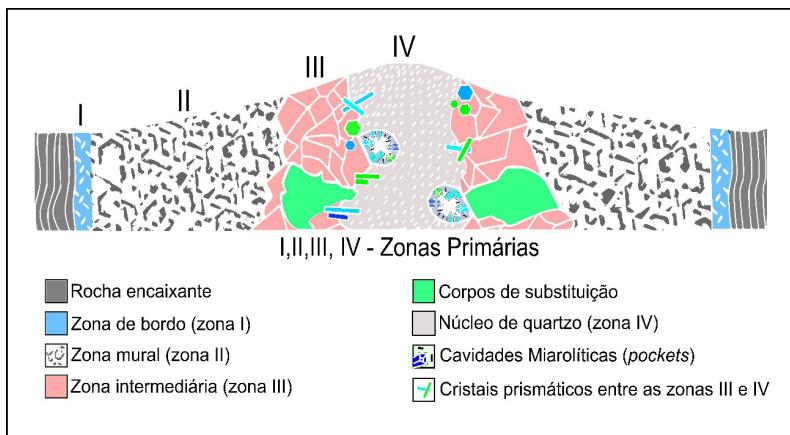
Embora trabalhada durante o período da I Guerra Mundial para a produção de micas, a PPB notabilizou-se durante a II Guerra Mundial pela excepcional produção de berilo e tantalatos, que serviram de matéria-prima essencial para os esforços de guerra dos países aliados. Nesse período, somente o município de Picuí/PB que, na época, englobava também os municípios de Pedra Lavrada e Nova Palmeira, chegou a produzir cerca de 20% da produção mundial de tantalatos e 8 a 10% da produção mundial de berilo. Na época, foram trabalhados simultaneamente 160 pegmatitos (Rolff, 1946). Estima-se que, no período de guerra, foram produzidas 3.000 toneladas de tantalita e 20.000 toneladas de berilo (Beurlen *et al.*, 2008). Por esse motivo, os corpos pegmatíticos da região foram denominados de “pegmatitos berilo-tantalíferos” (Johnston Jr., 1945) ou “pegmatitos tântalo-gluciníferos” (Rolff, 1951).

Johnston Jr. (1945) classificou os pegmatitos da PPB, quanto à estrutura interna, em homogêneos (sem zoneamento textural-mineralógico) e heterogêneos (zonados).

Os pegmatitos homogêneos são constituídos essencialmente por quartzo, feldspatos e muscovita, podendo conter schorlita, almandina, berilo, columbita-tantalita e/ou cassiterita. São normalmente tabulares, com pequena variação granulométrica e de dimensões menores que os pegmatitos heterogêneos. Sobre o ponto de vista econômico são pouco interessantes.

Os pegmatitos heterogêneos (Figura 2), constituídos de quartzo, feldspatos e micas, geralmente contêm quantidades consideráveis de tantalatos, berilos, cassiterita, espodumênio, granadas, schorlita, elbaítas, entre outros minerais. São muito interessantes sobre o ponto de vista econômico devido principalmente as suas maiores dimensões e mineralogia muito diversificada, incorporando.

Figura 2 - Corte transversal de pegmatitos heterogêneos ilustrando sua estrutura interna



Fonte: Modificado de Johnston Jr. (1945) e Soares (2004).

A zona III (destacada em róseo) é considerada a zona econômica dos pegmatitos heterogêneos, pois nessa unidade ocorrem berilos, tantalatos, elbaítas e outras fases minerais de interesse econômico.

Embora essa estruturação interna proposta por Johnston Jr. (1945), a partir de estudos em pegmatitos da PPB, tenha sido um trabalho pioneiro, a nível mundial, cabe a Cameron *et al.* (1949), equivocadamente, o mérito da generalização da estrutura interna de pegmatitos graníticos.

Atualmente, a produção mineral da PPB está concentrada em minerais industriais, como feldspatos, quartzo (Figura 3), micas e caulim, entre outros (Alves *et al.*, 2019) ou gemas, como subproduto casual de pegmatitos trabalhados para a extração de outros bens minerais (Soares *et al.*, 2018).

Figura 3 - Lote de quartzo róseo do pegmatito Alto Feio, Pedra Lavrada, Paraíba, pronto para comercialização



Fonte: Soares *et al.*, 2016.

A PPB também se notabiliza pela expressiva produção de gemas, com muitos pegmatitos com potencial gemológico, notadamente os da região Parelhas-Equador, Rio Grande do Norte e de São José da Batalha, Paraíba (Soares *et al.*, 2018). Produz, entre outros, elbaítas, euclásio, heliodoro, morganita, água marinha, espessartita, gahnita. De acordo com Soares *et al.*, 2024), a PPB possui pelo menos 17 pegmatitos portadores de euclásio, mineral raro, utilizado como gema e como mineral de coleção. Poucas províncias pegmatíticas, no mundo, abrigam essa expressiva quantidade de ocorrências de euclásio.

No ano de 1988, foi descoberta em pegmatitos de São José da Batalha, Salgadinho, Paraíba, uma excepcional elbaíta gema-lógica, com alto teor de CuO, de cor azul turquesa, conhecida

comercialmente por turmalina “Paraíba”. Posteriormente, foram também encontradas nos pegmatitos Capoeira, Quintos e Carrascão, ambos no Rio Grande do Norte. Por se tratar de uma gema muito rara, seu preço, no mercado internacional, por quilate (1ct = 0,2g) alcançou US\$ 20,000 (Barreto e Bittar, 2010). A turmalina Paraíba é, sem dúvida, o produto mais nobre produzido nos pegmatitos da PPB.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Província Pegmatítica da Borborema, apesar de ser conhecida e lavrada desde o início do Século XX, ainda se ressente de estudos detalhados em relação à mineralogia, geoquímica e de geocronologia. Muitos dos pegmatitos citados na

literatura ainda não foram devidamente estudados, ou são alvos de estudos preliminares.

É imprescindível a realização de estudos sistematizados e contínuos nos pegmatitos da PPB, como ocorre em outras províncias do mundo, podendo gerar um substancial banco de dados contendo grande número de informações. Atualmente, os dados disponíveis estão dispersos em relatórios técnicos, trabalhos acadêmicos ou artigos publicados em periódicos brasileiros ou estrangeiros.

Também se faz necessário o estudo de pegmatito em profundidade, através de sondagens e métodos geofísicos, pois os pegmatitos apresentam zoneamento vertical, mostrando mudanças na mineralogia conforme o nível de profundidade atingido. Isso pode levar a um aproveitamento mais racional dos corpos pegmatíticos. Atualmente, nos pegmatitos da região, trabalhados normalmente por garimpagem, há uma grande perda de minerais econômicos, pois os trabalhos de lavra não são realizados com orientação técnica. Os garimpeiros praticam uma lavra ambiciosa, excluindo minerais de

menor valor econômico, que deveriam ser aproveitados como subproduto, gerando uma maior renda.

Muitos pegmatitos da PPB, trabalhados por décadas, têm acumulado em seu entorno grandes volumes de resíduos (rejeitos da lavra), com soterramento de minerais passíveis de aproveitamento industrial. Torna-se importante utilizar esse material como fonte secundária (de baixo custo) de matéria-prima para diversos usos industriais. Para tanto são necessários estudos sistematizados de caracterização tecnológica para determinar o uso mais adequado para esse material.

REFERÊNCIAS

- ALVES, W.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M. Mining co-operatives: A model to establish a network for sustainability. **Journal of Co-operative Organization and Management**, v. 7, n. 1, p. 51–63, 2019.
- BALARAM, V.; SANTOSH, M.; SATYANARAYANAN, M.; SRINIVAS, N.; GUPTA, H. Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. **Geoscience Frontiers**, v. 15, p. 101868, 2024.
- BARRETO, S.B.; BITTAR, S.M.B. The gemstone deposits of Brazil: Occurrence, production, and economic impact. **Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana**, v. 62, n.1, p.123-140, 2010.
- BEURLEN, H.; DA SILVA, M.R.R.; THOMAS, R.; SOARES, D.R.; OLIVIER, P. Nb-Ta-(Ti,Sn) oxide mineral chemistry as tracer of rare-element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, Northeastern Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 43, p. 207-228, 2008.
- CAMERON, E.N., JAHNS, R.H., MCNAIR, A.H. & PAGE, L.R. Internal structure of granitic pegmatites. **Economic Geology** (Monography, 2). 115p, 1949.
- ČERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regional to global environments and petrogenesis. **Geoscience Canada**, v. 18, n. 2, p. 68-81, 1991.

- DANTAS, J. A atuação das cooperativas na atividade mineral no Seridó paraibano: os casos da Coopicuí e Coomipel. 127p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2017.
- DA SILVA, M.R.R.; HÖLL, R.; BEURLEN, H. Borborema Pegmatitic Province: Geologic and geochemical characteristics. **Journal of South American Earth Sciences**, v.8, p.355-364, 1995.
- JARDIM DE SÁ, E.F. A Faixa Seridó (Província Borborema, Nordeste do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasiliana/Pan-Africana. 804p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 1994.
- JOHNSTON Jr., W.D. Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil. **DNPM/DFPM** (Boletim 72). Rio de Janeiro, 85p. 1945.
- LEBROUHI, B.E.; BAGHI, S.; LAMRANI, B.; SCHALL, E.; KOUSKSOU, T. Critical materials for electrical energy storage: Li-ion batteries. **Journal of Energy Storage**, v. 55, p. 105471, 2022.
- LONDON, D. Reading pegmatites: Part 1 - What beryl says. **Rocks & Minerals**, v.90, n. 2, p. 138-156, 2015.
- ROLFF, P.A.M.A. Os pegmatitos da Borborema (notas sobre a sua pesquisa e lavra). **Revista Escola de Minas**, n. 4, p. 55-63, 1951.
- ROLFF, P.A.M.A. Reservas minerais do município de Picuí. **DNPM/DFPM** (Boletim n. 80). Rio de Janeiro, 63p., 1946.
- SCORZA, E.P. Província Pegmatítica da Borborema (Nordeste do Brasil). **DNPM/DGM** (Boletim n. 112). Rio de Janeiro, 55p., 1944.
- SIMMONS, W.B. Gem-bearing pegmatites. In: The Geology of Gem Deposits (ed. Lee A. Groat) **Mineral Association of Canada** (Short Course Series), v. 37, p. 169-206, 2007.
- SOARES, D.R. Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gemológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. 286p. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SOARES, D.R.; BEURLEN H.; DA SILVA, M.R.R.; GONZAGA, F.A.S.; SANTOS FILHO, J.I.; OLIVEIRA, H.B.L. Variedades gemo-lógicas de minerais da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil: uma síntese. **Estudos Geológicos**, Recife, v. 28, n. 1, p. 56-71, 2018.

SOARES, D.R.; GONZAGA, F.A.S.; FERREIRA, A.C.M.; CAITANO, H.K.C.; FARIAS, A.B.; SOUSA, D.B. Aspectos técnicos da lavra do pegmatito “Alto” Feio, Pedra Lavrada, Paraíba. **Holos**, Natal, ano 32, v.1, p. 404-412, 2016.

SOARES, D.R.; SANTOS FILHO, J.I.; GONZAGA, F.A.S.; ARAÚJO, A.M.M. Euclásio nos pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema: uma síntese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 51, 2024, **Anais**...Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 2024. p.841,

WISE, M.; MÜLLER, A.; SIMMONS, W. A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. **The Canadian Mineralogist**, v. 60, p. 229-248, 2022.

ZHOU, J.; WANG, Q.; WANG, H.; MA, J.; ZHU, G.; ZHANG, L. Pegmatite lithium deposits formed within low-temperature country rocks. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, p. 447, 2025.

CAPÍTULO 2

PEGMATITOS DA PARAÍBA E DO RIO GRANDE DO NORTE: RICOS EM MINERAIS E GEMAS

José Aderaldo de Ferreira Medeiros¹

BREVE DESCRIÇÃO DE ALGUNS PEGMATITOS DA PARAÍBA E DO RIO GRANDE DO NORTE.

ALTO BOQUEIRÃO DE PARELHAS

Alto Boqueirão de Parelhas, Alto Boqueirão ou Alto do Cabeço são alguns dos nomes atribuídos ao maior e mais conhecido pegmatito produtor de minerais metálicos, de gemas e de outras substâncias minerais existentes na Província Borborema/Seridó, lavrado por métodos garimpeiros, desde a época da II Guerra Mundial, quando o Brasil passou a exportar metais estratégicos para os Estados Unidos.

O Alto do Cabeço está localizado 3 km a Leste da Cidade de Parelhas - RN. Foi estudado pela primeira vez pelo geólogo norte-americano Dr. Johnston Jr. no período da II Guerra Mundial. A serra, onde está localizada, tem uma altitude de 490 metros. Foi pesquisado, de forma integral, por norte-americanos e nordestinos,

¹ Geólogo pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Professor aposentado da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG aderaldo@cetem.gov.br.

num esforço de guerra, visando, principalmente, à produção de berilos e tantalatos.

Tem a forma de um grande dique que se adelgaça para Noroeste (NW) e alarga-se para Sudeste (SE), delineando, em superfície, uma imensa canoa, escavada quase que integralmente, até profundidades de 9 a 14 m, e a partir dessa base, em galerias, poços e “shafts”.

Está orientado segundo a direção geral NW/SE, discorrente dos metaconglomerados e quartzitos encaixantes, orientados segundo uma direção norte/sul (N/S) e mergulhos suaves de até 15° W, com “plunge” para norte (N).

ALTO SÃO SEBASTIÃO

Em 1932, Jáder Medeiros, procurando columbita no Pegmatito São Sebastião, em Santa Luzia do Sabugi, encontrou um bolsão com muitos berilos azuis e no meio deles uma água marinha gema, biterminada, muito bonita, pesando 38g, sem defeitos. Na época, pelo conhecimento que ele já tinha sobre pedras preciosas, já dissera ser aquela, a primeira água-marinha encontrada no Nordeste do Brasil. A gema caiu nas mãos de Mário Ferreira, irmão do autor e hoje está em sua coleção.

DISTRITO GEMOLÓGICO DE TENENTE ANANIAS

No Município de Tenente Ananias, localizado no extremo oeste do Estado do Rio Grande do Norte, está encravado um pequeno Distrito Gemológico, onde ocorre uma reserva muito grande de água-marinha. Ali a produção desta gema, tida como símbolo do nosso País, atingiu picos de produção que chegaram a suplantar às das maiores Províncias Gemológicas do Brasil. Outras águas-marinhas foram encontradas em pegmatitos produtores de

tantalitas, manganotantalitas e outros metálicos, em altos como: a “mina do Mangano” em São Tomé, Brennand e São Miguel, em Junco do Seridó, no Alto do Giz em Equador.

A Província Gemológica Borborema/Seridó cobre uma extensa área dos Municípios de Santa Luzia, São Mamede, Várzea, São José do Sabugi, Junco do Seridó, Juazeirinho, Soledade, Cubati, Pedra Lavrada, Nova Palmeira, São Vicente, Picuí, Carnaúba dos Dantas, Acari, Jardim do Seridó e Currais Novos, nos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte.

Esta grande Província Gemológica do Seridó/Borborema se destaca, na região, pela abundância de minerais e de produção, tanto de turmalinas, incluindo a chamada “azul-paráiba”, como de água-marinha, de outros berilos-bemas, como a morganita (rósea e azul), o heliodoro, o berilo-ouro, a goshenita, além de gemas como a cordierita, o quartzo-ametista, citrino, hialino, róseo, esfumaçado; a herderita, as granadas da família da espessartita, os espinélios como a gahnita e outra de cor azul, encontrados em um pegmatito do município de Acari-RN, scheelita incolor transparente (gema), como a que foi encontrada na localidade Várzea da Canoa,

Município de Pedra Lavrada/PB, em um veio de feldspatoide, que não deixa de ser um pegmatito!

Entre os anos de 1969 e 1971, a SUDENE firmou um acordo de Cooperação técnica com a Alemanha. A “Missão Geológica Alemã” trabalhou com a Divisão de Geologia da SUDENE. Fui indicado para chefiar o grupo brasileiro, ficando o grupo alemão chefiado por Georg Andritzky e Klaus Busch. Em certa noite do ano de 1971, reunida toda a Equipe na mina de Scheelita Malhada Vermelha, em Santa Luzia, fomos surpreendidos por um pequeno grupo de garimpeiros conduzindo 35 a 40 pedrinhas com cerca de 20 gramas, provenientes de São José da Batalha! As famosas futuras “turmalinas Paraíba”.

No ano de 1981, com o pensamento nas pedrinhas verdes e azuis da “Missão Geológica Alemã”, visitamos o Distrito de São José da Batalha por várias vezes. Cadastramos a ocorrência com destaque para as gemas azuis. Projetamos e executamos uma pesquisa preliminar. Logo depois disso, chegaram outros interessados, com destaque para o Sr. Heitor, que a partir dali desenvolveu o trabalho, produziu e tornou as turmalinas azuis, conhecidas no mundo inteiro, como sendo as famosas “turmalinas azuis Paraíba” (Ferreira, 2011).

JAZIDA DE TURMALINA DO CATOLÉ

Como resultado dos trabalhos executados no Programa “Cadastramento de Ocorrências de Minerais Gemas do Nordeste”, ficou demonstrado a existência, entre outras áreas, de uma com grande potencialidade em turmalinas-gemas, englobando os Municípios de Juazeirinho, Junco do Seridó e Salgadinho, no Estado da Paraíba. A região citada caracteriza-se pela presença de corpos mineralizados, como os pegmatitos e áreas com depósitos secundários do tipo detritico eluvionar, todos contendo turmalinas-gemas, como as que ocorrem nos pedimentos da Serra de São Miguel, no Município de Junco do Seridó, produtor de belíssimas turmalinas róseas, límpidas, com sinais de rolamento indicando pequeno transporte; como, principalmente, o da Fazenda Catolé, no Distrito de Barra, Município de Juazeirinho, com suas turmalinas, predominantemente, de cor verde-folha inconfundível com cristais totalmente limpos.

A Jazida está situada na antiga Fazenda do Catolé, no Município de Juazeirinho-PB. Fica próximo à localidade do Serrotão, às margens do Riacho Seridózinho, 2 km a leste da Rodovia BR-230, entre a Vila de Barra e a cidade de Junco do Seridó.

O que se verifica em Catolé, de uma forma bem evidente, é uma concentração de turmalinas-gemas, predominantemente de cor verde-folha, em cristais ou pedaços de cristais, sem nenhuma

evidência de rolamento no sentido horizontal, apenas indicando uma queda gradual, no sentido vertical, à medida que as Rochas foram sendo lentamente desgastadas pelo intemperismo, com o rebaixamento gradual de todo o terreno daquela região, formando uma camada relativamente espessa de massame e cascalho, na qual foram depositadas as turmalinas cristalizadas, limpas, sem sinais de rolamento! As mais limpas turmalinas encontradas na Província Borborema/Seridó (Ferreira, 2011).

Logo depois de concluída a pesquisa, ocorreu uma fase de mineração de pequena escala, por parte dos garimpeiros, no sentido de explorar a jazida para retirada de turmalinas-gemas. A Mina ficou famosa pelo tamanho de suas Pedras, pela pureza como Gema de fina qualidade, cor homogênea, sem jaças, de 5qt a 20qt!. A Figura 1 mostra lote de turmalinas.

Figura 1 - Lote de turmalinas verde-folhas - Catolé/PB.



Fonte: O autor.

ALTO MIRADOR

Localização - A área situa-se exatamente na divisa entre os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, limite dos Municípios de Frei Martinho-PB e Carnaúba dos Dantas-RN, no Distrito do Ermo, na localidade denominada Mirador. Destaca-se pela regularidade e tamanho das amostras.

Histórico - O Alto Mirador foi descoberto nos primórdios da atividade de exploração dos Recursos Minerais no Seridó, até aquela época uma atividade incipiente, incapaz de suprir as necessidades surgidas com a grande estiagem de 1919. Entre 1943 e 1944, o Sr. Severino Gomes, residente em Picuí-PB, executou as primeiras escavações no corpo pegmatítico portador das Granadas. Somente em 1972 é que Luizélio Barreto chegou ao Mirador para reiniciar os trabalhos exploratórios. Requeriu a área e entrou em contato com o então proprietário, Sr. José Azevedo Filho, celebraram um contrato de comodato, por período de 10 anos para explorar a jazida.

Em 1982, foi realizada uma pesquisa preliminar na jazida de minerador, pelo “Programa de Cadastramento de Ocorrências de Minerais Gemas do Nordeste”. Em 1984, com o resultado da pré-pesquisa, foi elaborado um trabalho “Caracterização Gemológica e Estudo Geoeconômico das Espécies Raras de Minerais Gemas do Alto Minerador-RN-1984”. Dados de Geologia Econômica – O Alto Minerador – está delimitado por um corpo pegmatítico granítico, como parte de uma família de corpos intrusivos, que cortam os quartzitos da formação Equador. O mesmo vem sendo explorado, de maneira intermitente, para a produção de espessartita. É um corpo zonado, subdividido em 6 zonas, incluindo a de enriquecimento hidrotermal. São elas: 1º Zona de Núcleo; 2º Zona Intermediária Interna; 3º Zona Intermediária Média; 4º Zona Intermediária Externa, 5º Zona de Muro e a 6º Zona de Enriquecimento por Substituição.

As principais características mineralógicas das gemas do minerador são: espessartita, da família das granadas, em cores que variam do laranja escuro ao claro e gahnita, do grupo dos espinélios, nas cores verde, tendentes para o escuro. (Ferreira, 1969).

ALTO DOS AMÂNCIOS

A natureza apronta surpresas, aleatoriamente, distribuídas nas rochas produtoras de minerais, especialmente nos pegmatitos sem os controles necessários que pudessem definir seus conteúdos minerais. O garimpeiro tem espírito aventureiro, arrisca seu último centavo no palpite, apesar de saber que alguns produtos lhes dão a garantia das custas do investimento! Este fato o distancia bastante do “jogador”.

Um dos Altos discutidos é o Alto dos Amâncios, um pegmatito granítico heterogêneo, zonado, localizado nas cabeceiras do Rio Seridó, em um trecho muito profundo do vale, na região conhecida como “Quintos de Cima”, Município de Equador-RN, o qual destaca-se pela singularidade da iridescência das suas amostras minerais.

Os trabalhos foram iniciados em 1976, quando “Zé Amâncio” retirou as primeiras toneladas de feldspatos, na sequência foram minerais como colombotantalita, berilo, além dos minerais formadores – feldspato, quartzo róseo e micas. Esporadicamente foram encontrados bolsões enriquecidos em gemas, especialmente berilo-ouro e heliodoro, com alguns cristais bem formados, biterminados e belíssimos.

Posteriormente, em 2003, outros bolsões de lama surgiram, destacando-se como um fato curioso, raro e auspicioso, de grande valor econômico das amostras, a presença de cristais de berilo-ouro, corroídos e cobertos por uma tênue camada iridescente, nunca vistos em quaisquer outros Altos pegmatíticos do Brasil, talvez do mundo, revolucionando o setor! A iridescência manifestou-se também, nas variedades de quartzo, especialmente no Tomé, nos tantalatos e mais

raramente nas albitas. Naquela época, os garimpeiros chamavam de “furta-cor”! (Ferreira, 2011).

ALTO SERRA BRANCA

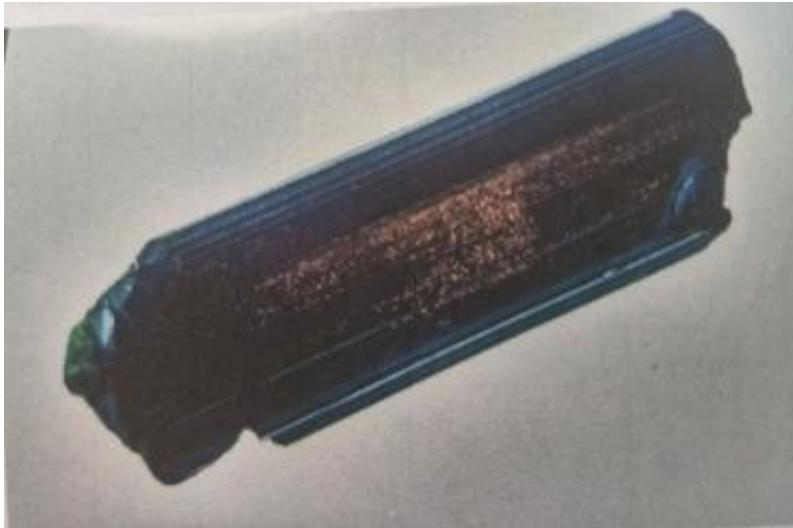
O alto serra branca é um pegmatito granítico, enriquecido em lítio, césio e tântalo e como quase todos eles foram explorados por garimpeiros, tendo sido, durante anos, produtor histórico de mica, feldspato, quartzo, espodumênio, tantalatos e cassiterita. Está localizado no Município de Pedra Lavrada, cerca de 9 km a sul de sua sede, por estrada carroçável. Tem uma direção de 80° AI, com mergulho sub-vertical. Está encaixado nos Biotita Xistos da Formação Seridó, é do tipo heterogêneo, com zonas bem definidas. O corpo passou por diversos processos de enriquecimento hidrotermal, que resultaram na formação de bolsões ricos em gemas, incluindo belíssimas turmalinas azuis (indicolitas), verdes e bicolores róseas/azuis. Há alguns anos, foram descobertas as primeiras turmalinas elbaíticas, com qualidade gemológica, em várias tonalidades azuis, algumas bicolores. (Ferreira, 1969).

ALTO SÃO JOSÉ DA BATALHA

A ocorrência fica no Município de Salgadinho, porção central da Paraíba, no local denominado de São José da Batalha, Sítio Saco da Onça, a 15 km de Assunção. A Jazida destaca-se pela qualidade e beleza de suas Amostras e Gemas. Por conta da presença de Cobre nas suas Turmalinas, tanto nas azuis, como nas verdes azuladas, nas vermelhas e até nas verdes folhas, hoje todas são consideradas “Turmalinas Paraíba”. Atualmente a mina principal encontra-se parcialmente paralisada por questões legais, no entanto o pegmatito é portador de uma das gemas mais belas e caras do mundo: a

“turmalina azul paraíba”. A Figura 2 mostra turmalina do Alto São João da Batalha – PB.

Figura 2 - Turmalina produzida no Alto São José da Batalha - PB, verde, mas totalmente coberta por pequenos cristais de cobre



Fonte: O autor.

ALTO MARIAS PRETAS

O Alto Marias Pretas possui um pegmatito que nunca foi explorado por empresas ou garimpeiros, sendo assim considerado um “alto virgem”. Localizado no município de Santa Luzia-PB, a aproximadamente 500-600 metros a leste do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB), aflora apenas a parte superior do seu núcleo de quartzo-hialino e róseo, cortado por pequenas grutas, como a famosa “Gruta de Lau”, onde um cidadão costumava dormir todas as noites em sua solidão. Destaca-se a presença de água-marinha de cor azul escura, transparente e limpa em seus

aluviões, como uma pedra de 14 quilates, que após ser lapidada, se tornou uma das mais bonitas encontradas no Seridó (Figura 3).

Figura 3 - Água marinha de excelente qualidade, pesando 14 qt, encontrada no Alto Marias Pretas- PB., na década de 1970



Fonte: O autor.

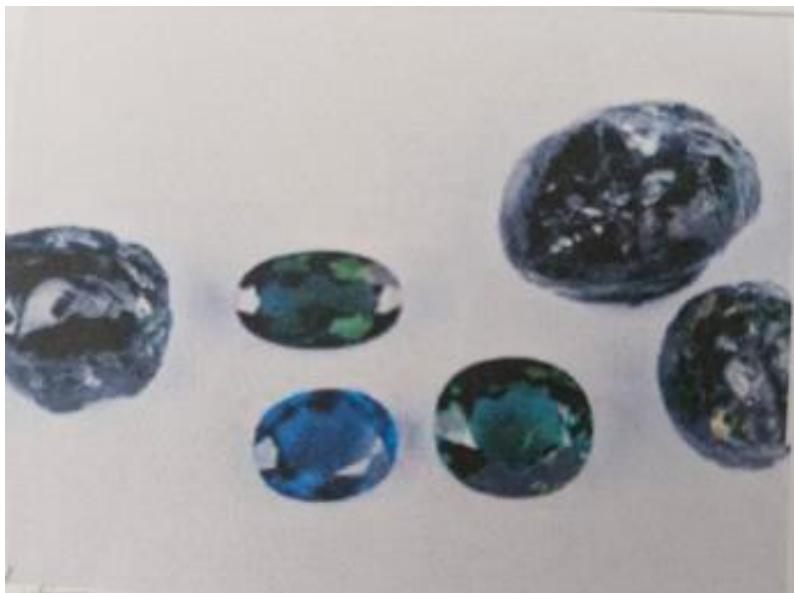
ALTO QUIXABA

O pegmatito conhecido como “Jazida” Zé da Quixaba, está localizado no Município de Frei Martinho/PB. É um corpo granítico heterogêneo, zonado, enriquecido de lítio (Li), sódio (Na) e óxido de sílica (SiO_2), composto por 2 corpos distintos, perpendiculares e intercruzados, orientado a 60° oeste do norte ($\text{N}60^\circ\text{W}$) e mergulho de 80° SN, ou seja, orientado a 60 graus a oeste do norte e inclinada quase verticalmente a 80 graus, com a inclinação direcionada para o sul e o norte. A zona externa contém feldspato K, quartzo e muscovita, com agregados de turmalinas pretas do tipo

“schoorlita”. Uma zona intermediária com microclima, quartzo, albita, muscovita, ambligonita e berilo verde-amarelo (heliodora) além de microlita, manganotantalita e turmalinas verdes e azuis. A zona interna é formada por um quartzo cinza, pouco diferenciado.

As elbaítas gemas de cor verde-gramado são as chamadas verde-quixaba. As azuis esverdeadas e as azuis são as mais apreciadas! Todas elas têm cor de topo, o que as valoriza muito. O notório, no Alto Quixaba, é a existência de uma microlita especial, da série pirocloro/microlita, com hábitos arredondados achatados, cor verde folha-escuro, mostrando em muitas amostras transparência! Na realidade, é uma nova variante da série (um novo mineral), descoberta e citada, pela primeira vez, por Ana Cláudia M. Ferreira, em 1997, no seu trabalho de tese, as turmalinas do Alto de Quixaba-PB (Ferreira, 2011) (Figura 4).

Figura 4 - Turmalinas do Alto Quixaba-PB, produzidas na década de 1990



Fonte: Ferreira, 2011.

MINERAIS METÁLICOS OCORRENTES

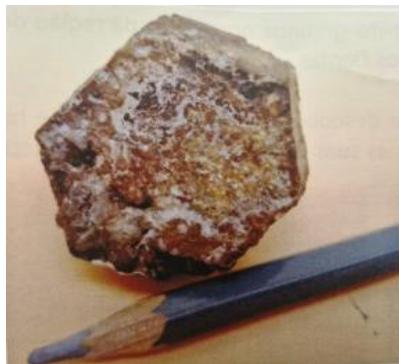
As primeiras investidas de garimpeiros e algumas empresas de mineração, na exploração de pegmatitos, nos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, foram feitas nos anos 30 e 40 do século XX, tendo prosseguido com maior intensidade entre os anos 50 e 60. Os primeiros visados foram os feldspatos e os quartzos, incluindo as ametistas, logo a seguir os ore shuts, lavrados para a retirada de parte mais valiosa, os minerais metálicos, tais como: columbita, tantalita, manganotantalita, caristerita e ferro tapirota ($Fe,Mn)Ta_2O_6$. Entre tantos “Altos” produtores daquela Província, todos relevantes, incluem-se: “feio, malhada de areia, fortuna, porfírio, cágado, damião, besouro, quixaba, chagas, esperas, favela, sossego, patrimônio, onça, tanquinhos, brennand, giz, mina nova do chagas, amâncio, são miguel, trigueiro, massaranduba, da cruz, bico d’arara, saco do boi, cumaru, tibiri e muitos outros” (Ferreira, 1969).

No Distrito de Seridózinho, foram encontrados mais de 100 pegmatitos produtores que se sobressaíram pela produção de cassiterita e tantalita. Entre os anos de 1954 e 1957, foi instalado um forno de carvão na mina principal para redução da cassiterita, com a obtenção do estanho metálico. A antiga mina de Serdosinho atualmente produz os mesmos minerais e pesquisa a ocorrência de espodumênio, aparentemente, em quantidade e qualidade suficiente para implantação de um projeto mineiro. As Figuras 5 e 6 mostram diferentes cristais.

No Alto dos Amâncios, localizado no município de Equador/RN, há belíssimos cristais terminados, artisticamente corroídos por soluções ácidas lançadas em emanações epitermais tardias, na medida certa, pelas mãos hábeis da natureza, concluindo, em uma derradeira fase, absolutamente especial, a qual deixou suas marcas sob a forma de uma película superficial, que tingiu de iridescências as

superfícies dos cristais, especialmente dos berilos-ouro, dos quartzos e das colombo-tantalitas, constituindo um conjunto paragenético atípico.

Figura 5 - Um perfeito cristal hexagonal de simpsonita, terminação pinacoidal, pesando 111 gramas, procedente do Alto do Giz, Equador, RN. Talvez o maior encontrado no NE



Fonte: Coleção Ferreira & Tavares.

Figura 6 - Cristais biterminados, vermelhos, de manganotantalita, procedentes do Alto Cajazeiras, Município paraibano de Assunção



Fonte: O autor.

AMOSTRAS MINERAIS PARA COLEÇÃO

As pedras preciosas, hoje denominadas por gemas, tanto podem ser lapidadas, como apresentarem-se no estado natural, desde que tenham as condições necessárias para que, depois de elaboradas, possam ser utilizadas em joalheria, em coleções minerais (como amostras) e em museus.

Nessa introdução, citamos sete exemplos de jazidas pegmatíticas, bem diversificadas, cada uma com suas peculiaridades, todas situadas nos Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba.

É importante destacar que as principais qualificações para definir uma gema,

- Beleza → Cor, transparência, graus de luminosidade e de saturação.
- Raridade → Disponibilidade limitada na natureza e dificuldade de extração.
- Durabilidade → Dureza (resistência ao traço), tenacidade (resistência ao choque).
- Moda (“Fashion”) → A moda em vaga supervaloriza uma gema.
- Transportabilidade → O pequeno volume facilita um transporte, favorecendo o mercado de gemas.
- Marketing → Presente em outras qualificações, sem sombra de dúvidas, com estratégias de promoção, valor de mercado e percepção do consumidor.

As Figuras 7 e 8 são exemplos de beleza e durabilidade de gemas:

Figura 7 - Água-marinha lapidada, em forma de gota, de cor azul-celeste, sem defeitos, pesando 12,8 qt, obtida de um garimpo localizado na região da Malhada, Junco/PB



Fonte: Coleção Ferreira e Tavares.

Figura 8 - Indicolita azul lapidada, pesando 13,15 qt, com um lote de gemas brutas de cor azul-safira, todas com “cor de topo”. Alto Zé Jusino - Equador/RN



Fonte: O autor.

As Figuras de 9 a 12 são exemplos de raridade de gemas.

Figura 9 - Uma “Figa” em quartzo natural iridescente. Alto dos Amâncios, Equador/RN



Fonte: O autor.

Figura 10 - Cristal de turmalina tricolor, do Alto Catolé, pesando 47g. - Junco/ Juazeirinho-PB



Fonte: O autor.

Figura 11 - Cristal de água-marinha, do Alto São Sebastião, foi considerada a primeira água-marinha “gema” do Nordeste - Santa Luzia/PB



Fonte: Bambúrrio de Jáder Medeiros (1932).

Figura 12 - Cristais de apatita “gema” com “efeito alexandrita” - Alto Feio - Pedra Lavrada/PB



Fonte: O autor.

ALGUNS COLEÇÃOADORES DE GEMAS E MINERAIS DA PARAÍBA E RIO GRANDE DO NORTE

Diversos colecionadores podem ser citados neste trabalho. O senhor Valdemar Trindade, detentor da maior e melhor coleção mineral de pegmatitos do Seridó, esta localizada no município de

Parelhas-RN, com suas amostras, de modo geral, muito boas, muitas delas transparentes, isoladas ou compostas, com berilos (água-mariinha, heliodoro, morganita), muitas turmalinas em cores diversas (verdes, azuis, vermelhas, pretas), além de outros minerais, geralmente encontrados nos diversos Altos da região, já citadas. Conheci sua coleção quando estudante de Geologia no Recife, em 1960, em uma das excursões curriculares. Posteriormente, já trabalhando na SUDENE, adquiri algumas amostras do seu mostrário, algumas expostas nesse trabalho.

O senhor Mário Ferreira que, com sua coleção, apesar de mais simples, tinha também excelentes amostras, a exemplo como as da figura 13.

Figura 13 - Cristais de quartzo fumê com cobertura; ametista biterminada e “Flor da Caatinga”



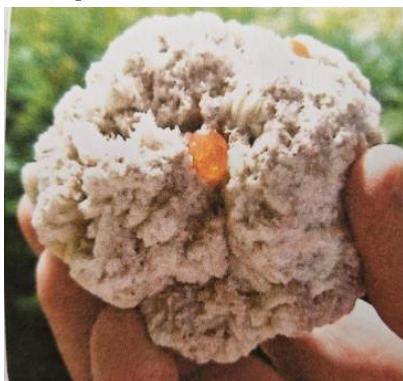
Fonte: Coleção Mário Ferreira/PB.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) possui, no Centro Gemólico do Nordeste, o Museu de Gemas – brutas e lapidadas que foram adquiridas através do Programa Gemas Nordeste – GENOR. Um prédio construído especialmente para abrigar o museu que inicialmente abrigou uma coleção de minerais

adquiridos por compra ou doações. Hoje, as amostras são pertencentes à UFCG, e o museu é aberto para visitação pública.

O senhor Luizélio Barreto, que era natural de Recife/PE, mas veio para o Seridó trabalhar em mineração . Foi por muitos anos o detentor do direito da lavra do Alto Mirador, o maior produtor de granadas espessartitas (de cor laranja) grande parte transparente e de gahnitas verdes também transparentes. Morreu muito novo e sua coleção foi vendida pela família. A amostra da Figura 14, adquirimos ao próprio.

Figura 14 - Cristal de Espessartita encravada na Cleavelandita, Alto Mirador



Fonte: O autor.

O senhor Aderaldo Ferreira (o autor deste capítulo), detentor de uma coleção diversificada de gemas e minerais de todo o mundo, mas em especial dos ocorrentes no Nordeste do Brasil. As Figuras 15 e 16 mostram alguns cristais desta coleção.

Figura 15 - Raríssimo cristal incolor de euclásio, com 90% de aproveitamento como gema, pesando 188g, sem jaças, talvez o maior já encontrado no Nordeste, com estas qualidades, procedente de um Alto no Município de Equador



Fonte: Coleção Ferreira e Tavares.

Figura 16 - Raríssimo Cristal de Herderita - Alto do Chagas - Frei Martinho/PB



Fonte: O autor.

REFERÊNCIAS

FERREIRA, J. A. de M. Trilhas da Mineração no Seridó. Campina Grande/PB.

SEBRAE, 236p. 2011.

FERREIRA, J. A. de M. Sinópse da geologia da fôlha Seridó. **Brasil: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Divisão de Geologia.** Recife/PE.1969.

CAPÍTULO 3

ECOFISIOLOGIA DA REGIÃO DO PEGMATITO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Agda Malany Forte de Oliveira¹

Eulália Margarethe da Costa Melo²

Guilherme Felix Dias³

Priscylla Marques de Oliveira Viana³

Semako Ibrahim Bonou⁴

Alberto Soares de Melo⁵

INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro é formado principalmente pela Província Borborema, caracterizada por crosta Arqueana/Paleoproterozoica retrabalhada (Caxito *et al.*, 2020), e representa uma das quatro províncias do Escudo Atlântico Brasileiro (Borborema, São Francisco, Mantiqueira e Tocantins), cobrindo uma área de cerca de 440.370 km². A mesma abrange os estados de Alagoas, Pernambuco,

1 Pós-doutoranda do Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Campus I, Campina Grande, PB.

2 Mestranda pelo Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Campus I, Campina Grande, PB.

3 Doutorandos do Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Campus I, Campina Grande, PB.

4 Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, PB.

5 Autor correspondente: alberto.melo@servidor.uepb.edu.br

Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, cuja formação remonta à Orogenia Brasiliiana (Freire, 2020; Santos *et al.*, 2023). Essa província compreende parte significativa do semiárido brasileiro — a maior região semiárida do mundo, com aproximadamente 982.566 km² (CONSEA, 2025) — e abriga uma das maiores províncias pegmatíticas do planeta, a Província Pegmatítica da Borborema (PPB) (Oliveira *et al.*, 2022).

A PPB é bastante conhecida pelas riquezas dos recursos minerais que estão presentes nas rochas pegmatíticas entre os maiores e mais diversos do mundo, apresentando abundantes ocorrências de pegmatitos hospedados em rochas gnáissico-migmatíticas do embasamento, sequências supracrustais e/ou granitos e migmatitos, que foram submetidos a múltiplos eventos tectônicos, levando a uma considerável complexidade estrutural (Souza *et al.*, 2020; Neves, 2021).

Os pegmatitos desta província têm notoriedade mundial, confirmada durante a Segunda Grande Guerra (1939-1945), quando da demanda bélica por substâncias estratégicas como Tântalo (Ta), Nióbio (Nb), Tungstênio (W), Lítio (Li), Berílio (Be) e Estanho (Sn) (Soares *et al.*, 2004). Esses pegmatitos são bem conhecidos por conterem uma riqueza de minerais economicamente relevantes, particularmente pedras preciosas como a “Turmalina Paraíba”, uma elbaíta cupriana azul-esverdeada excepcionalmente vívida ou violeta, e minerais industriais, incluindo quartzo de alta pureza, caulim e mica. Mais significativamente, a província ganhou atenção por seus pegmatitos contendo lítio (Silva *et al.*, 2024).

As características pedológicas e revelo da região da PPB conferem uma série de mudanças nas características e atributos do solo, pois regem tanto a dinâmica hídrica quanto a drenagem, controlando a intensidade dos processos de formação (Pinheiro Júnior *et al.*, 2019), essas características geológicas, pedológicas, climáticas, agrícolas e populacionais proferem uma importância intercontinental

à região, que não apenas despertam o interesse geoeconômico, mas também moldam ambientes edáficos e microclimáticos específicos (Sousa *et al.*, 2023).

A região da PPB abriga uma diversidade de espécies vegetais que, ao longo do tempo evolutivo, desenvolveram adaptações ecofisiológicas para se completarem seu ciclo nas condições ambientais da região. Essas adaptações podem também ser chamadas de plasticidade fenotípica, ou seja, a capacidade de um organismo de mudar, adaptar- se ou responder a estímulos ou entradas do ambiente, como baixa fertilidade do solo ou estresses abióticos (Gratani, 2014).

Nesse contexto, as plantas presentes nessas regiões pegmatíticas desenvolvem um conjunto importante de adaptações ecofisiológicas para a sua sobrevivência e estabelecimento. Em vista disso, compreender a importância e o papel que o ambiente pode afetar as respostas morfológicas, fisiológicas, e bioquímicas que permitem a essas plantas prosperar em condições ambientais desafiadoras é fundamental para entender a dinâmica ecológica desses ecossistemas únicos. A ecofisiologia, ao integrar o estudo das respostas fisiológicas dos organismos aos fatores ambientais, oferece as ferramentas conceituais e metodológicas para compreender os mecanismos subjacentes à adaptação das plantas aos estresses abióticos característicos dos ambientes de pegmatitos na PPB.

Portanto, o presente capítulo objetivou-se explorar o panorama ecofisiológico das plantas que habitam a região do pegmatito da Província Pegmatítica da

Borborema. Serão abordadas as principais respostas das espécies vegetais através das adaptações em seus processos fisiológicos, estrutura e desenvolvimento frente às condições de cultivo da região, e como os fatores abióticos influenciam nessas respostas; além disso, como as ações antrópicas também interferem nas respostas ecofisiológicas das plantas, logo espera-se contribuir para uma compreensão

mais aprofundada da biodiversidade regional e fornecer subsídios para futuras pesquisas e estratégias de conservação.

ADAPTAÇÕES E RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DAS PLANTAS DA REGIÃO PPB EM FUNÇÃO DE FATORES ABIÓTICOS

Há uma diversidade de espécies vegetais na região da PPB e que são adaptadas às variadas condições ecofisiológicas. Nessa região há períodos de seca severos, e dentre as adaptações morfológicas para evitar a desidratação, podem-se citar o aumento da espessura da cutícula, redução do tamanho e número das folhas, dobramento ou enrolamento reversível das lâminas foliares, abortamento foliar, aumento da seção transversal e de vários vasos condutores (Sharma *et al.*, 2024).

Plantas em ambientes propensos à seca devem desenvolver muitas estratégias para resistir a déficits hídricos, incluindo diminuição da área foliar, aumento da extensão das raízes, fechamento estomático e ajuste osmótico. Tais estratégias podem ser classificadas em dois tipos: adiamento da dessecação e tolerância à dessecação que diz respeito à capacidade de resistir ao estresse hídrico com altos ou baixos potenciais hídricos, respectivamente (Dombroski *et al.*, 2011).

O estresse vegetal ocorre quando os parâmetros ideais para o crescimento de determinada espécie são alterados por condições ambientais adversas (Mehta; Vyas, 2023). A região PPB abrange uma vasta extensão do Nordeste brasileiro, sendo, portanto, incluída na região semiárida brasileira, a qual apresenta fatores abióticos que influenciam as respostas ecofisiológicas das plantas, tais como, a alta variação no padrão e no total de chuvas anuais, além de altos níveis de radiação solar e temperatura do ar (Cavalcante *et al.*, 2021; Melo *et al.*, 2022) Na Tabela 1, apresentamos as principais adaptações

morfológicas e fisiológicas que as plantas podem adotar quando submetidas a estresses abióticos.

Tabela 1 - Adaptações morfológicas e fisiológicas das plantas submetidas a estresses abióticos

| Fator Ambiental | Descrição do Estresse | Morfológicas | Fisiológicas |
|-----------------|---|--|--|
| Déficit Hídrico | Disponibilidade hídrica insuficiente | Senescênciadas folhas Fechamento estomático Redução da superfície foliar Desenvolvimento das raízes Acúmulo de cera na superfície foliar | Redução do potencial hídrico (ψ) Inibição fotossintética Produção de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos Ajuste Osmótico |
| Salinidade | Acúmulo excessivo de cátions e ânions no solo | Crescimento lento Redução do comprimento radicular Espessamento da cutícula | Redução do potencial hídrico (ψ) Ajuste Osmótico Hiperacumulação |
| Temperatura | Temperatura elevada e radiação solar alta | Desenvolvimento das raízes Redução do número estomáti-co Inibição da germinação Redução da biomassa Alteração da orientação foliar | Produção de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos Ajuste Osmótico Ativação de fatores de transcrição de choque térmico |

Fonte: Própria.

Ademais, parte dos mananciais possui altos níveis de salinidade, o que, associado ao baixo nível tecnológico empregado na agricultura, dificulta ainda mais o cultivo. Destaca-se ainda que a agricultura de sequeiro é uma prática muito comum na região, no entanto, pode ser considerada de alto risco em relação ao número e à intensidade de períodos de seca durante o período chuvoso, especialmente nos anos de seca severa (Melo *et al.*, 2022). Esses estressores

têm efeitos profundos nas funções fisiológicas da planta (Tabela 1), impactando, em última análise, a produção (Raza *et al.*, 2021).

As plantas sob diferentes condições ambientais estressantes podem responder de várias maneiras por meio de adaptações morfológicas, fisiológicas e ecológicas que as ajudam a lidar com tais variações (Tabela 1). Primeiramente, o estresse é detectado, isso pode ocorrer em vários compartimentos celulares, posteriormente, eventos de sinalização acontecem por meio das proteínas reguladoras como Ca^{2+} e proteínas cinases. A sinalização de estresse desencadeia mudanças na transcrição

genética, processamento de RNA, tradução de proteínas, resultando na produção e modificação de proteínas que desempenham vários papéis em respostas ao estresse (Zhang *et al.*, 2022).

As respostas das plantas a tais estresses variam de espécie para espécie e podem ser de longo ou curto prazo. Essas respostas se dão por meio de mecanismos das plantas que envolvem evitar o estresse e/ou tolerância a ele. Acrescente-se que as respostas de longo prazo afetam o ciclo da cultura, a maturação dos grãos, a morfogênese da raiz, a alocação de nutrientes, a desidratação celular e também a senescência além de envolver soluções para evitar o estresse, como mudanças morfológicas e fisiológicas no crescimento da planta, estrutura da folha, comportamento estomático, fotossíntese, minimizando, assim, a perda de água (Sharma *et al.*, 2024).

Morfologicamente a regulação das respostas ao estresse das plantas é intrínseca e coordenada com outros processos essenciais, com destaque para as vias relacionadas ao crescimento. Assim, o aumento da resistência ao estresse das plantas é, na maioria das vezes, acompanhado pelo efeito colateral indesejável de crescimento reduzido de maneira geral ou de partes específicas da planta. Essa redução no crescimento se inicia com um menor suprimento de energia da planta ao inibir a atividade do fotossistema II, por meio da redução da abertura estomática para minimizar o uso de água,

induzindo assim, uma série de efeitos negativos nos fotossistemas (Zhang *et al.*, 2020). Saliente-se que essas estratégias, embora resultem em menor crescimento, permitem que a planta se mantenha viva, com os processos biológicos essenciais em pleno funcionamento. Esse mecanismo foi descrito nos estudos de Cavalcante *et al.* (2024) e Oliveira *et al.* (2023), os quais constataram que, mesmo sob estresse, as plantas continuaram em desenvolvimento, ainda que com crescimento reduzido.

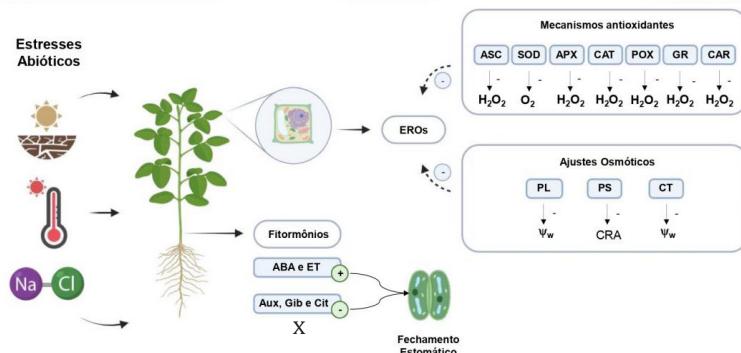
O mecanismo antioxidante, seja ele enzimático ou não-enzimático, corresponde a uma estratégia de curto prazo, que normalmente associado a ações de resposta à tolerância. Esta estratégia envolve adaptações fisiológicas e bioquímicas, a qual ocorre nas plantas principalmente por meio do ajuste osmótico, reguladores de crescimento, estabilidade da membrana celular e sistemas de defesa antioxidante. Esta ação antioxidante quando ocorre pela via enzimática, utiliza-se de três principais enzimas, sendo elas a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX). Nesse processo, a SOD se apresenta como primeira linha de defesa, minimizando os efeitos nocivos do dano oxidativo (Batool *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2024).

Além dos mecanismos supracitados, podem-se citar também as respostas de ajustamento osmótico e de osmoproteção, as quais são ações de tolerâncias de curto prazo, envolvendo adaptações fisiológicas e bioquímicas nas plantas, principalmente por meio da produção de solutos orgânicos com diferentes funções. Esse processo baseia-se no movimento da água e sua relação com solo, planta e atmosfera, em que os movimentos do mesmo são regidos por diferenças nos gradientes do potencial hídrico, processo no qual a água flui de espaços com maior potencial hídrico para espaços com menor potencial hídrico. Desse modo, sob estresses de seca, as plantas podem acumular íons inorgânicos e osmólitos para reduzir o seu

potencial e reequilibrar o seu gradiente de potencial hídrico (Sharma *et al.*, 2024; YU *et al.*, 2024).

Diante do pressuposto, resumimos de forma esquemática como os estresses abióticos influenciam os processos ecofisiológicos nas plantas da região do pegmatito da Província Pegmatítica da Borborema (Figura 1).

Figura 1 - Estresses abióticos influenciam os processos ecofisiológicos nas plantas da região do pegmatito da Província Pegmatítica da Borborema. ABA - Ácido Abscísico; ET - etileno; Aux - Auxinas; Gib - giberelina; Cit - Citocinina; EROS - espécies reativas de oxigênio; H₂O₂ - Peróxido de hidrogênio; O₂ - Ânion superóxido; ASC - Ascorbato; SOD - Superóxido dismutase; APX - Ascorbato peroxidase; CAT - Catalase; POX - Fenol peroxidase; GR - Glutationa redutase; CAR - Carotenoides; w - Potencial hídrico; CRA - Conteúdo relativo de água; PL- Prolína livre; PS - Proteínas solúveis; CT - Carboidratos totais (+) - Aumento e (-) Diminuição



Fonte: Os autores.

Frente aos desafios abióticos característicos da Província Pegmatítica da Borborema, as plantas manifestam resiliência através de estratégias ecofisiológicas. A capacidade de evitar e/ou tolerar o estresse por meio de alterações morfológicas e fisiológicas aliada aos mecanismos de tolerância como a ação antioxidante e o ajuste osmótico, ilustra a plasticidade adaptativa das plantas locais (Figura 1). Embora o crescimento possa ser comprometido em condições de

estresse, essas estratégias garantem a manutenção das funções biológicas essenciais. O estudo dessas respostas é essencial para identificar espécies com maior potencial de adaptação e para o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem a agricultura e a conservação no Semiárido.

AÇÕES ANTRÓPICAS E SEUS EFEITOS NA ECOFISIOLOGIA DAS PLANTAS

A ecofisiologia vegetal investiga como fatores ambientais influenciam os processos fisiológicos das plantas. Nos últimos séculos, as atividades antrópicas provocaram profundas alterações ambientais, afetando direta e indiretamente a dinâmica dos ecossistemas terrestres (IPCC, 2023). Entre essas atividades, destacam-se a conversão de habitats, a intensificação agrícola, a poluição atmosférica e o aquecimento global, todos responsáveis por alterar padrões fisiológicos essenciais para a sobrevivência e o desenvolvimento das plantas.

O aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico é uma das principais mudanças globais induzidas pelo ser humano. Em condições controladas, níveis elevados de CO_2 podem estimular a taxa de fotossíntese líquida (A) em muitas espécies, principalmente nas plantas do tipo C_3 (Ainsworth; Rogers, 2007; Abou *et al.*, 2022). No entanto, esse benefício pode ser atenuado por limitações nutricionais, alterações hídricas ou incremento de estresses oxidativos. A poluição por ozônio troposférico (O_3) também representa uma ameaça crescente à função fotossintética. A exposição ao O_3 induz estresse oxidativo, danificando membranas celulares, inibindo a atividade da Rubisco e acelerando a senescência foliar (Fiscus *et al.*, 2005; Nowroz *et al.*, 2024). Esses efeitos comprometem a produtividade agrícola e a estabilidade dos ecossistemas naturais.

A intensificação dos eventos de seca e das ondas de calor, previstos nos cenários de mudanças climáticas, tem impactos significativos sobre o funcionamento vegetal (Allen *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2023). O déficit hídrico induz o fechamento estomático como resposta imediata, reduzindo a assimilação de CO₂ e limitando a fotossíntese (Chaves *et al.*, 2009; Abdalla *et al.*, 2022). Em paralelo, o aumento da temperatura pode desestabilizar proteínas e membranas, inibindo processos como a fotofosforilação e a fixação de carbono (Ding *et al.*, 2022).

Espécies adaptadas a ambientes áridos e semiáridos exibem estratégias fisiológicas específicas, como ajuste osmótico, modulação do sistema antioxidante e alterações na arquitetura radicular para maximizar a captação de água (Mohanta *et al.*, 2024). No entanto, espécies sensíveis apresentam declínio funcional e maior risco de mortalidade sob condições extremas.

A transformação dos usos do solo, como a agricultura intensiva e a urbanização, altera as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, impactando a relação planta-solo (Zheng *et al.*, 2021). A diminuição da diversidade microbiana associada às raízes reduz a disponibilidade de nutrientes e a resiliência das plantas ao estresse. Alterações na microbiota também afetam a simbiose com micorrizas e rizóbios, fundamentais para a nutrição e o crescimento de muitas espécies vegetais (Gupta *et al.*, 2021; Röthig *et al.*, 2023). Assim, o impacto antrópico no solo é um componente crítico da modificação ecofisiológica.

Diante das pressões ambientais impostas, muitas plantas recorrem à plasticidade fenotípica para ajustar seu funcionamento fisiológico (Nicotra *et al.*, 2010; Yavari *et al.*, 2021). Essas respostas envolvem mudanças em traços como área foliar específica, relação raiz/parte aérea, teores de clorofila e eficiência do uso da água. Apesar dessa capacidade adaptativa, há limites intrínsecos à plasticidade. Em condições de estresse severo ou múltiplos estresses

combinados, a resposta adaptativa pode ser insuficiente, resultando em declínio populacional ou substituição por espécies mais tolerantes (Valladares *et al.*, 2014; Mahdavian, 2024).

O entendimento das respostas ecofisiológicas das plantas às alterações antrópicas é essencial para prever mudanças nos ecossistemas e orientar estratégias de manejo e conservação. A integração entre estudos experimentais e modelos preditivos permitirá a construção de práticas agrícolas e florestais mais resilientes frente às rápidas transformações ambientais em curso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ecofisiologia desempenha um papel importante na compreensão da dinâmica das espécies vegetais que habitam na Província Pegmatítica da Borborema, uma região caracterizada por condições ambientais desafiadoras. Observa-se que as plantas que ocorrem nessa região possuem uma diversidade de adaptações ecofisiológicas, tais como: estratégias morfológicas e fisiológicas, permitindo que sobrevivam e desenvolvam-se mesmo em condições de estresses abióticos, como déficit hídrico, salinidade e altas temperaturas e radiação solar. Nesse sentido, há necessidade de dar continuidade às pesquisas sobre a ecofisiologia na PPB, visando à obtenção de conhecimentos que possam subsidiar o desenvolvimento de estratégias de conservação eficazes e práticas de manejo sustentável, bem como encontrar aplicações no desenvolvimento de tecnologias que auxiliem a agricultura regional.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. *et al.* Stomatal closure during water deficit is controlled by below-ground hydraulics. **Annals of Botany**, v.129, n. 2, p.161-170, 2022.

ABOU SEEDA, M. A. *et al.* Impacts of metal, metalloid and their effects in plant physiology: a review. **Middle East Journal of Agriculture Research**, v. 11, n. 3, p. 838-931, 2022.

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell & Environment**, v. 30, n. 3, p. 258-270, 2007.

ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D.; McDOWELL, N. G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. **Ecosphere**, v. 6, n. 8, p. 1-55, 2015.

BATOOL, R. *et al.* Molecular mechanisms of superoxide dismutase (SODs)-mediated defense in controlling oxidative stress in plants. **Antioxidant Defense in Plants**. v. 1, n. 8, p. 157-179, 2022.

CAVALCANTE, E. S. *et al.* Supplemental irrigation using brackish water on maize in tropical semi-arid regions of Brazil: yield and economic analysis. **Scientia Agricola**, v.78, n. 1, p.1-9, 2021.

CAVALCANTE, I. E. *et al.* Salicylic acid improves cowpea productivity under water restriction in the field by modulating metabolism. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, n. 1, p. 1415682, 2024.

CAXITO, F. A. *et al.* Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil- NW Africa: The Borborema Province and its connections to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. **Brazilian Journal of Geology**, v. 50, n. 2, 2020.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, n. 4, p. 551-560, 2009.

CONSEA - Conselho Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional **Caracterização do Semiárido brasileiro**. Disponível em: <<http://www4.planalto.gov.br/consea/comunicacao/artigos/2014/caracterizacao-do-semiarido-brasileiro-1>>. Acesso em: 30 abr. 2025.

- DING, L. *et al.* The plasma membrane aquaporin ZmPIP2; 5 enhances the sensitivity of stomatal closure to water deficit. **Plant, Cell & Environment**, v. 45, n.4, p. 1146- 1156, 2022.
- DOMBROSKI, J. L. D. *et al.* Water relations of Caatinga trees in the dry season. **South African Journal of Botany**, v. 77, n. 2, p. 430-434, 2011.
- FENG, D. *et al.* Exogenous Substances Used to Relieve Plants from Drought Stress and Their Associated Underlying Mechanisms. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 17, 2024.
- FISCUS, E. L.; BOOKER, F. L.; BURKEY, K. O. Crop responses to ozone: Uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. **Plant, Cell & Environment**, v. 28, n. 8, p. 997-1011, 2005.
- FREIRE, D.M.N. **Caracterização cristaloquímica e cristalofísica sobre a gênese de turmalina e columbita-(fe) de pegmatitos das regiões de Solonópole e Berilândia no Estado do Ceará**. 2020. 109 f. Dissertação (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- GRATANI, L. Plant phenotypic plasticity in response to environmental factors. **Advances in Botany**. v. 14, n. 208747, p. 17, 2014.
- GUPTA, S. *et al.* Interactive effects of plant growth-promoting rhizobacteria and a seaweed extract on the growth and physiology of *Allium cepa* L.(onion). **Journal of Plant Physiology**, v. 262, n. 153437, p. 1-13, 2021.
- IPCC (2023). **Climate Change 2023: Synthesis Report**. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>.
- MAHDAVIAN, K. Effects of ultraviolet radiation on plants and their protective mechanisms. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 71:184, n. 6, p. 1-12, 2024.
- MEHTA, DHRUVISHA; VYAS, SUHAS. Comparative bio-accumulation of osmoprotectants in saline stress tolerating plants: A review. **Plant Stress**, v. 9, n. 1, p. 100177, 2023.
- MELO, A. S. *et al.* Water restriction in cowpea plants [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]: Metabolic changes and tolerance induction. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 26, n. 3, p. 190-197, 2022.

MOHANTA, T. K. *et al.* Physiology, genomics, and evolutionary aspects of desert plants. **Journal of advanced research**, 58, 63-78, 2024.

NEVES, S. P. Comparative geological evolution of the Borborema Province and São Francisco Craton (eastern Brazil): Decratonization and crustal reworking during West Gondwana assembly and implications for paleogeographic reconstructions. **Precambrian Research**, v. 355, n. 1, 2021.

NICOTRA, A. B. *et al.* Plant phenotypic plasticity in a changing climate. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 12, p. 684-692, 2010.

NOWROZ, F. *et al.* Elevated tropospheric ozone and crop production: Potential negative effects and plant defense mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, n. 1, 2024.

OLIVEIRA, A. P. S. *et al.* Osmoregulatory and antioxidants modulation by salicylic acid and methionine in cowpea plants under the water restriction. **Plants**, v. 12, n. 6, p. 1341, 2023.

OLIVEIRA, J. V. D. *et al.* Mapeamento geológico do Pegmatito Alto do Calango, Província Pegmatítica da Borborema. **Revista Principia**, v. 59, n. 4, p. 1262-1277, 2022.

PINHEIRO JUNIOR, C. R. *et al.* Pedogenesis in a topo-climosequence in the Agreste region of Pernambuco. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 2, p. 177-187, 2019.

RAZA, A. Eco-physiological and Biochemical Responses of Rapeseed (*Brassica napus* L.) to Abiotic Stresses: Consequences and Mitigation Strategies. **Journal of Plant Growth Regulation**. v. 40, n. 4, p. 1368-1388, 2021.

RÖTHIG, T. *et al.* Human-induced salinity changes impact marine organisms and ecosystems. **Global change biology**, v. 29, n.17, p. 4731-4749, 2023.

SANTOS, F. G. *et al.* Short Communication on "Updated geological map of the Borborema Province, northeastern Brazil". **Journal of the Geological Survey of Brazil**. v. 6, n. 1, p. 129-133, 2023.

SHARMA, V.; SHARMA, D. P.; SALWAN, R. Surviving the Stress: Understanding the Molecular Basis of Plant Adaptations and Uncovering the Role of Mycorrhizal Association in Plant Abiotic Stresses. **Microbial Pathogenesis**, v. 193, n. 1, 2024.

SILVA, G. F.; CORREA, R. T.; ALMEIDA, R. C. Enhancing Lithium Exploration in the Borborema Province, Northeast Brazil: Integrating Airborne Geophysics, Low-Density Geochemistry, and Machine Learning Algorithms. **Research Square**. V. 1, n. 1, p. 1-31, 2024.

SINGH, B. K. *et al.* Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. **Nature Reviews Microbiology**, v.21, n. 10, p. 640-656, 2023.

SOARES, D. R. **Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gemológicas da província pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil.** 2004. 286 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SOUSA, J. E. S. *et al.* Weathering and mineral alteration of metamorphic rocks and genesis of Planosols along a rainfall gradient in Borborema Province, Northeast Brazil. **Geoderma Regional**, v. 33, n. 1, 2023.

SOUZA, I. M. B. A. *et al.* A mineralogia acessória do Amazonita Pegmatito Serra Branca: classificação de um pegmatito NYF na Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP Série Científica**. v. 20, n. 3, p. 47-61, 2020.

VALLADARES, F. *et al.* The effects of phenotypic plasticity and local adaptation on forecasts of species range shifts under climate change. **Ecology Letters**, v. 17, n. 11, p. 1351-1364, 2014.

YAVARI, N. *et al.* The effect of light quality on plant physiology, photosynthetic, and stress response in *Arabidopsis thaliana* leaves. **PLoS one**, v. 16, n. 3, 2021.

YU, B.; CHAO, D. Y.; ZHAO, Y. How plants sense and respond to osmotic stress. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 66, n. 3, p. 394-423, 2024.

ZHANG, H.; ZHAO, Y.; ZHU, JK. Thriving under stress: how plants balance growth and the stress response. **Developmental Cell**, v. 55, n. 5, p. 529-543, 2020.

ZHANG, H. *et al.* Abiotic stress responses in plants. **Nature Reviews Genetics**, v. 23, n. 2, p. 104-119, 2022.

ZHENG, Z. *et al.* Anthropogenic impacts on Late Holocene land-cover change and floristic biodiversity loss in tropical southeastern Asia. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 40, 2021.

CAPÍTULO 4

HIDROLOGIA DO PEGMATITO ALTO DO PATRIMÔNIO, PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Celso Augusto Guimarães Santos¹

Reginaldo Moura Brasil Neto²

Raul Souza Muniz³

Richarde Marques da Silva⁴

INTRODUÇÃO

A hidrologia é uma ciência em constante evolução, voltada à compreensão dos processos do ciclo hidrológico e ao manejo sustentável dos recursos hídricos. Sua importância torna-se ainda mais evidente em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água é naturalmente limitada e a variabilidade climática exerce forte influência sobre os sistemas naturais e sociais (Dantas e Silva, 2019).

1 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB. Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Stokes School of Marine and Environmental Sciences, University of South Alabama, Mobile, AL 36688, EUA.

2 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB. Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

3 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB.

4 Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB. Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Diante do cenário global de crescente escassez hídrica, a análise integrada da hidrologia e da variabilidade espaço-temporal de variáveis como precipitação, clima, hidrografia, escoamento superficial, temperatura e evapotranspiração assume papel central na gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas (Santos *et al.*, 2017). O conhecimento aprofundado dos processos hidrológicos é essencial para o planejamento de obras de engenharia, a gestão racional dos recursos e a mitigação de riscos associados a eventos extremos (Nascimento *et al.*, 2018). Tal compreensão é indispensável não apenas para o dimensionamento adequado e econômico de estruturas hidráulicas, mas também para aplicações como a concepção de redes de monitoramento, a previsão hidrológica, a modelagem de bacias hidrográficas e a formulação de estratégias de adaptação climática (da Silva *et al.*, 2020).

Tradicionalmente, os processos hidrológicos são monitorados por meio de equipamentos instalados em pontos estrategicamente selecionados. Esses instrumentos permitem o registro da água em seus diferentes estados físicos, bem como de variáveis meteorológicas relevantes (Tucci, 2004).

No entanto, o monitoramento convencional está sujeito a limitações técnicas e operacionais: falhas na coleta de dados, preenchimento incorreto de formulários, danos aos equipamentos e transbordamentos podem comprometer a integridade das séries temporais. Nesse contexto, torna-se necessário o uso de métodos matemáticos para o preenchimento de lacunas e para a realização de análises de consistência estatística, a fim de garantir a confiabilidade das informações hidrológicas.

Além dos métodos tradicionais, os avanços nas tecnologias de sensoriamento remoto e o uso de produtos derivados de satélites ampliaram a capacidade de monitoramento das chuvas, sobretudo em áreas de difícil acesso ou com baixa densidade de estações meteorológicas (Gadelha *et al.*, 2019). Embora apresentem limitações

relacionadas à resolução espacial e à calibração local, essas estimativas oferecem uma alternativa valiosa à rede pluviométrica convencional, viabilizando análises mais abrangentes em escalas local, regional e global (Mishra *et al.*, 2025). Independentemente da fonte de dados utilizada, a identificação e caracterização de padrões de precipitação constituem subsídios indispensáveis para diversos setores da sociedade e para a conservação dos ecossistemas.

Nesse contexto, destaca-se a necessidade de uma análise abrangente do comportamento hidrológico em regiões semiáridas, como o Pegmatito Alto do Patrimônio, inserido na Província Pegmatítica da Borborema. Em particular, no semiárido brasileiro, a análise da precipitação configura-se como instrumento fundamental para o planejamento do uso do solo e para a mitigação dos impactos associados a eventos de seca. O entendimento da hidrologia local é crucial para o gerenciamento dos recursos hídricos em escala regional e para a formulação de políticas públicas voltadas à convivência com períodos prolongados de estiagem (Silva *et al.*, 2018).

A região do Pegmatito Alto do Patrimônio, de expressiva relevância geológica e mineralógica, carece de estudos voltados à sua hidrologia. A compreensão dos processos hidrológicos locais é fundamental para avaliar a variabilidade temporal das chuvas, os riscos associados à escassez hídrica e as possibilidades de aproveitamento sustentável das águas superficiais e subterrâneas. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo principal realizar uma caracterização da hidrologia da região do Pegmatito Alto do Patrimônio, visando avaliar a variabilidade dos principais fenômenos do ciclo hidrológico e fornecer subsídios técnicos para o planejamento e a gestão hídrica local.

O CLIMA E SUA INFLUÊNCIA NA HIDROLOGIA

Na região do Pegmatito Alto do Patrimônio, a interação entre os sistemas atmosféricos e o relevo acentua a influência do clima,

impactando diretamente a disponibilidade de água para o abastecimento humano, a agricultura e a mineração (Nascimento *et al.*, 2021). O clima predominante é o tropical equatorial, com ocorrência do subclima semiárido, caracterizado por temperaturas elevadas e por um regime pluviométrico que apresenta de 7 a 11 meses secos ao longo do ano (Alvares *et al.*, 2013). No que se refere ao índice de aridez, os valores para a região variam entre 13 e 20, classificando-a como uma área semiárida (Lisboa *et al.*, 2023).

A variabilidade climática da região é condicionada por diversos sistemas atmosféricos. Entre os principais, destacam-se: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), responsável pelas chuvas no verão; os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), que ocorrem com frequência na mesma estação e estão associados a instabilidades atmosféricas locais (Herdies *et al.*, 2002); e as Ondas de Leste, que transportam umidade proveniente do atlântico tropical. Além desses, a atuação de bloqueios atmosféricos e da Oscilação Sul também contribui para a ocorrência de períodos prolongados de seca. A interação desses sistemas com o relevo e a vegetação influencia de maneira decisiva o comportamento climático da região (Reboita *et al.*, 2010).

A PRECIPITAÇÃO

A precipitação na região do Pegmatito Alto do Patrimônio é caracterizada por elevada irregularidade temporal e espacial, influenciando diretamente a dinâmica hidrológica local. A escassez e a variabilidade dos volumes precipitados comprometem a recarga dos aquíferos e reduzem o escoamento superficial, tornando os recursos hídricos da região limitados e altamente vulneráveis à ocorrência de secas. Em termos de distribuição interanual, os totais pluviométricos apresentam ampla variabilidade, oscilando entre aproximadamente 250 mm, em anos de forte estiagem, e até 600 mm, em anos excepcionalmente chuvosos (Diniz e Pereira, 2015).

Para a realização da análise pluviométrica da região, foram utilizados dados de postos pluviométricos distribuídos pelos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. As séries históricas de precipitação diária foram disponibilizadas gratuitamente por duas instituições públicas: a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA (Governo da Paraíba, 2022) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN (Governo do Rio Grande do Norte, 2022). No período de 30 anos compreendido entre 1994 e 2023, foram identificados 15 postos na Paraíba e 49 no Rio Grande do Norte com registros de precipitação sobre a área de estudo.

Durante a etapa de triagem dos dados, observou-se uma elevada incidência de falhas nas séries temporais, especialmente nos postos localizados no estado do Rio Grande do Norte. Na Paraíba, dos 15 postos inicialmente avaliados, nove apresentaram séries completas de precipitação diária para todo o período analisado, enquanto outros quatro registraram mais de 85% de dados disponíveis. Em contraste, a situação no Rio Grande do Norte mostrou-se mais crítica: nenhum dos 49 postos dispunha da série completa. Apenas sete apresentaram mais de 90% de dados válidos, e cinco postos adicionais superaram o limiar mínimo de 85% de completude.

Neste estudo, adotou-se o critério de exclusão de todas as séries com mais de 15% de falhas. Para os postos com até 15% de dados ausentes, procedeu-se ao preenchimento das lacunas com base em métodos estatísticos. O processo de correção considerou dois parâmetros principais: a distância entre os postos e o coeficiente de correlação linear entre as séries disponíveis. Assim, os postos com maior similaridade, tanto espacial quanto estatística, foram selecionados para o preenchimento das falhas. O procedimento consistiu na seleção dos três postos mais próximos e com melhor correlação com aquele que apresentava falhas. A partir dos dados disponíveis nesses postos auxiliares, as lacunas foram preenchidas com base em ponderações derivadas da relação estatística entre as séries. A

Equação 1 apresenta o método utilizado para o preenchimento dos dados ausentes:

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{M_x}{M_A} P_A + \frac{M_x}{M_B} P_B + \frac{M_x}{M_C} P_C \right)$$

Onde:

P_x = precipitação no posto com falha, no período a ser corrigido, em milímetros (mm);

M_x = média da precipitação do posto a ser corrigido ao longo de todo o período (mm); M_A , M_B e M_C = médias de precipitação dos postos A, B e C, respectivamente (mm);

P_A , P_B e P_C = valores de precipitação registrados nesses postos no período correspondente à falha (mm).

Após o preenchimento, foi conduzida uma análise de consistência dos dados corrigidos. Durante esse processo, três postos localizados no Rio Grande do Norte, embora tivessem atendido ao critério mínimo de completude (mais de 85% dos dados), foram descartados da análise final por apresentarem valores extremos incompatíveis com o regime pluviométrico típico da região e de seus arredores, levantando dúvidas quanto à confiabilidade das medições.

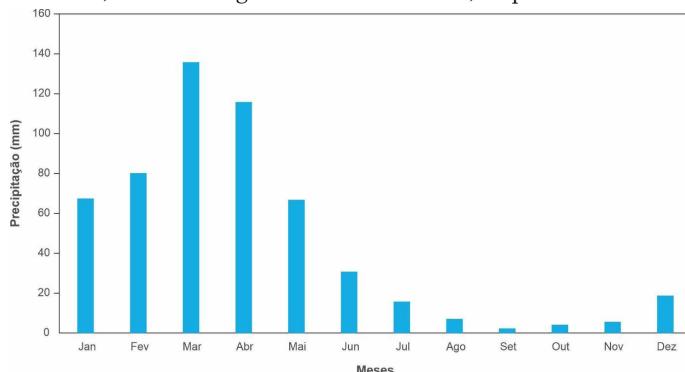
Dessa forma, o conjunto final de dados utilizado neste estudo foi composto por 22 postos pluviométricos, sendo 13 localizados no estado da Paraíba e nove no estado do Rio Grande do Norte. As séries de precipitação foram consolidadas nas escalas mensal e anual, compreendendo o período de janeiro de 1994 a dezembro de 2023, totalizando quase 8.000 registros mensais distribuídos sobre a área de estudo.

Optou-se por realizar a análise nas escalas mensal, anual e interanual, em detrimento da escala diária, considerando a elevada variabilidade e flutuação dos dados diários de precipitação. Essa decisão justifica-se pelo objetivo principal do estudo, que é a caracterização do comportamento pluviométrico regional. Assim, a abordagem adotada mostrou-se adequada para atender às demandas da pesquisa, permitindo a identificação de padrões sazonais e tendências de longo prazo com maior clareza e robustez estatística.

A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição temporal da precipitação média mensal na região do Pegmatito Alto do Patrimônio ao longo dos últimos 30 anos. Os resultados indicam elevada variabilidade entre os meses, sendo o período de janeiro a maio o mais chuvoso, com destaque para março e abril, quando a precipitação média mensal ultrapassa os 120 mm. Esse intervalo corresponde à estação chuvosa predominante da região, concentrando a maior parte do volume anual de precipitação. Segundo Bernardino *et al.* (2023), os municípios localizados na porção oeste da região tendem a registrar volumes pluviométricos superiores aos das demais áreas. A distribuição temporal da precipitação também revela que os meses de julho a dezembro são, historicamente, os mais secos, com valores médios que raramente ultrapassam os 30 mm. Essa dinâmica evidencia a forte estacionalidade e a expressiva variabilidade intra-anual do regime pluviométrico local. O mês de junho, por sua vez, pode ser caracterizado como um período de transição entre a estação chuvosa e a estação seca.

Figura 1 - Distribuição da precipitação média mensal na região do Pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema, no período de 1994 a 2023



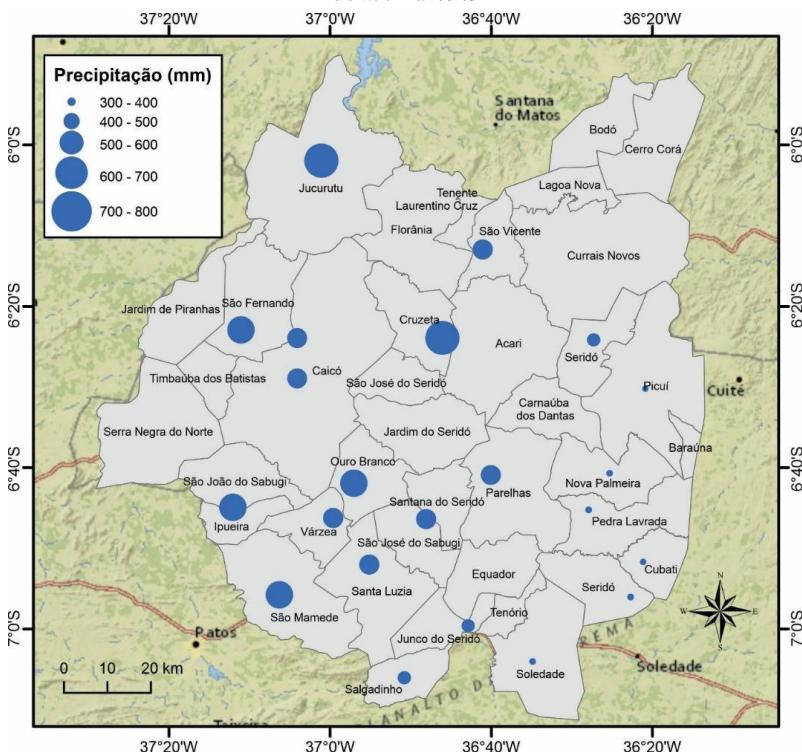
Fonte: Própria.

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial da precipitação média anual na região do Pegmatito Alto do Patrimônio ao longo dos últimos 30 anos. Assim como observado na escala mensal, os dados revelam elevada variabilidade espacial na distribuição anual da precipitação. Os valores médios indicam uma amplitude significativa: há áreas com totais anuais inferiores a 400 mm, como no município de Picuí (PB), enquanto outras registram volumes superiores a 700 mm, a exemplo de São João do Sabugi (RN). Essa discrepança ressalta a complexidade do regime pluviométrico local, influenciado por fatores como o relevo, os padrões de circulação atmosférica e as condições microclimáticas. Em termos de distribuição espacial, as áreas mais úmidas concentram-se predominantemente na porção oeste da região, ao passo que as áreas mais secas estão localizadas na porção leste. Com base nos dados dos 22 postos pluviométricos utilizados, verifica-se que mais de 75% dos locais monitorados apresentam precipitação média anual inferior a 620 mm. Outros três postos registram valores entre 620 mm e 690 mm, enquanto apenas dois apresentam totais superiores a 700 mm anuais.

A Tabela 1 apresenta os valores estatísticos relacionados à variabilidade da precipitação média quinquenal na região do Pegmatito Alto do Patrimônio ao longo dos últimos 30 anos. Os resultados indicam elevada variabilidade interanual da precipitação, característica esperada em áreas inseridas no Semiárido Nordestino. Os dois primeiros quinquênios, de 1994 a 1998 e de 1999 a 2003, apresentaram níveis intermediários de precipitação, com médias regionais em torno de 500 mm anuais. O período de 2004 a 2008 destacou-se como o mais úmido do intervalo analisado, com média anual superior a 650 mm. Entre 2009 e 2013, observou-se uma redução acentuada nos volumes de chuva e, especialmente no quinquênio de 2014 a 2018, a região enfrentou os menores níveis pluviométricos da série histórica. Em diversos municípios, os valores registrados foram os mais baixos das últimas três décadas, reflexo de uma das

secas mais severas da história recente da região, com impactos significativos sobre os setores econômico e social. No quinquênio mais recente, de 2019 a 2023, verificou-se uma recuperação parcial dos volumes precipitados, com médias anuais superiores a 620 mm em várias áreas, embora ainda inferiores às observadas no período mais úmido.

Figura 2 - Distribuição espacial da precipitação média anual na região do Pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema, no período de 1994 a 2023



Fonte: Própria.

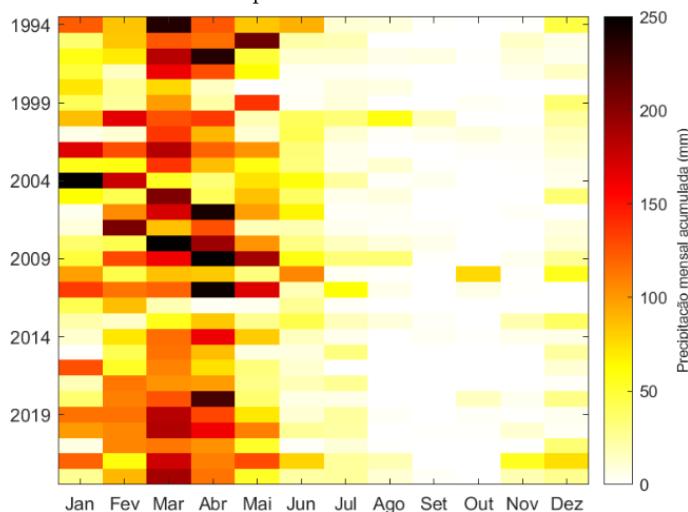
Tabela 1. Estatísticas da variabilidade quinquenal da precipitação média anual na região do Pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema, no período de 1994 a 2023

| Análises | Precipitação (mm) | | | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 1994– 1998 | 1999– 2003 | 2004– 2008 | 2009– 2013 | 2014– 2018 | 2019– 2023 |
| Média | 519,80 | 509,40 | 654,60 | 568,50 | 430,00 | 623,50 |
| Desvio padrão (mm) | 122,54 | 91,06 | 95,20 | 94,50 | 116,94 | 138,92 |
| Desvio médio (mm) | 95,96 | 75,50 | 78,44 | 75,66 | 97,14 | 107,79 |
| Coef. de variação (%) | 23,58 | 17,87 | 14,54 | 16,62 | 27,20 | 22,28 |

Fonte: Dados elaborados pelos autores a partir das séries pluviométricas da AESA (Governo da Paraíba, 2022) e da EMPARN (Governo do Rio Grande do Norte, 2022), referentes ao período de 1994 a 2023.

A Figura 3 apresenta uma síntese dos resultados em nível regional, destacando a variabilidade da precipitação mensal e anual ao longo dos últimos 30 anos. A análise permite observar os volumes médios mensais e anuais de precipitação, calculados a partir da ponderação das áreas de influência dos postos pluviométricos por meio do método de Thiessen. Os resultados corroboram as análises pontuais previamente discutidas e evidenciam que a região apresenta um regime pluviométrico altamente variável. Em determinados meses, a precipitação é praticamente nula (retângulos brancos), enquanto em outros, registram-se volumes significativos de chuva (retângulos escuros). Dentre os anos mais úmidos do período, destacam-se 1994, 2004, 2011, 2022 e, especialmente, 2009, este último com precipitação média anual próxima de 1.000 mm, influenciada pelos elevados volumes registrados nos meses de março e abril. Por outro lado, os anos de 1998, 2012, 2013 e 2015 figuram entre os mais secos, com destaque para 2012, que apresentou precipitação média inferior a 200 mm. A média anual regional de precipitação ao longo do período analisado foi de pouco mais de 570 mm, valor que reforça o caráter semiárido da área e a necessidade de estratégias eficazes de monitoramento, armazenamento e uso racional da água.

Figura 3 - Variação mensal e interanual da precipitação acumulada média na região do Pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema, no período de 1994 a 2023



Fonte: Dados elaborados pelos autores a partir das séries pluviométricas da AESA (Governo da Paraíba, 2022) e da EMPARN (Governo do Rio Grande do Norte, 2022), referentes ao período de 1994 a 2023.

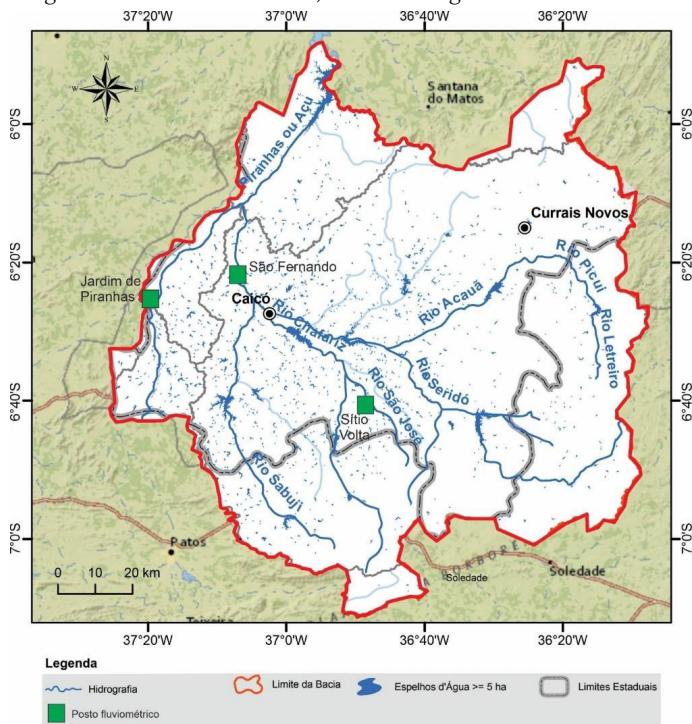
HIDROGRAFIA E O ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A região em estudo está inserida na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, com área aproximada de 10.610 km², tendo como principal curso d'água o rio Seridó, que atravessa os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba (Figura 4). A principal sub-bacia da área corresponde à do próprio Rio Seridó. A hidrografia regional é caracterizada predominantemente por rios intermitentes; no entanto, em alguns trechos, observa-se a perenização dos cursos d'água em função da ação antrópica, sobretudo pela construção de barramentos ao longo dos canais fluviais.

De modo geral, os postos fluviométricos registram maiores vazões nos meses de maior precipitação e apresentam rebaixamento

significativo entre os meses de junho e dezembro, podendo chegar a vazões nulas em todos os postos da região (Rodrigues *et al.*, 2023). O posto fluviométrico que apresenta as vazões mais expressivas é o de Jardim de Piranhas, localizado no médio curso do Rio Piranhas-Açu, já no estado do Rio Grande do Norte (ANA, 2010). No que se refere aos recursos subterrâneos, observa-se que, em muitas áreas da região, não há aquíferos produtivos, em razão do substrato geológico predominantemente rochoso, o que limita significativamente a disponibilidade hídrica subterrânea (Diniz *et al.*, 2017).

Figura 4 - Rede hidrográfica e localização dos postos fluviométricos na região do Pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema



Fonte: Dados elaborados pelos autores. Bases espaciais: NASA, ANA, IBGE.

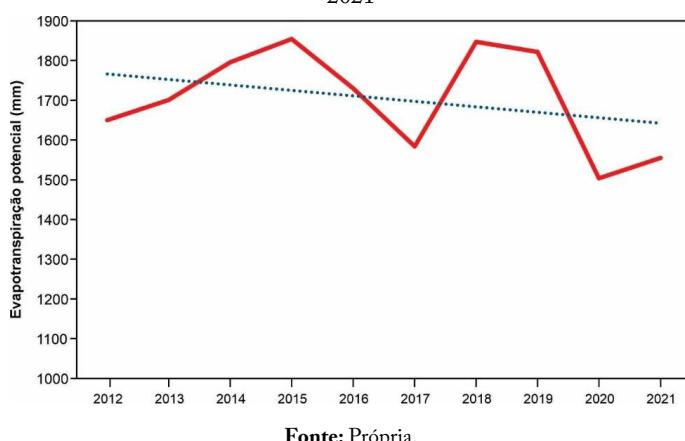
A VARIABILIDADE DA TEMPERATURA E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

A região do Pegmatito Alto do Patrimônio apresenta significativa variabilidade térmica e elevadas taxas de evapotranspiração ao longo do anos (Da Silva *et al.*, 1995). A Figura 5 mostra a variabilidade da evapotranspiração potencial média anual estimada para a região. A metodologia utilizada para a obtenção desses dados baseou-se em Silva *et al.* (2019), que empregaram imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS, instalado a bordo dos satélites Terra (produtos MOD) e Aqua (produtos MYD). Para este estudo, foram utilizados os seguintes produtos do sensor MODIS: (a) MOD09A1 e MYD09A1 (relativos à temperatura da superfície) e (b) MOD11A2 e MYD11A2 (referentes à emissividade da superfície). Esses produtos foram utilizados para o período de 2010 a 2020 e foram obtidos por meio do *Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center* (LAADS DAAC), da NASA⁵.

Os resultados indicam que a região apresenta elevados valores de evapotranspiração potencial, da ordem de 1.700 mm/ano, com déficit hídrico estimado em aproximadamente 1.000 mm durante nove meses do ano. O período analisado abrangeu anos de seca extrema na região (2012–2016), os quais apresentaram os maiores valores de evapotranspiração potencial. Observa-se que, após esse intervalo crítico, houve uma leve redução nos índices médios, tendência essa confirmada pela linha de tendência exibida na Figura 5.

⁵ Disponível em: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>.

Figura 5 - Variação anual da evapotranspiração potencial na região do Pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema, no período de 2012 a 2021



Fonte: Própria.

A evapotranspiração mensal na região do Pegmatito Alto do Patrimônio está entre as mais elevadas do Nordeste brasileiro, com valores diários médios próximos de 5 mm/dia. Esse padrão implica perdas hídricas significativas e contribui para o acentuado déficit hídrico observado. Tal comportamento é atribuído, sobretudo, às elevadas temperaturas médias, que giram em torno de 27 °C, com máximas próximas de 38 °C e mínimas em torno de 15 °C (Diniz e Pereira, 2015). A umidade relativa do ar varia entre 59% e 76%, e, quando combinada às condições térmicas e à intensa radiação solar, favorece os elevados índices de evapotranspiração registrados na região.

Adicionalmente, o número médio anual de horas de insolação é de aproximadamente 2.700 horas (Da Silva et. al., 2012). As elevadas temperaturas médias intensificam os processos de evapotranspiração, reduzindo a disponibilidade hídrica nos solos e nos reservatórios. Essa dinâmica afeta diretamente atividades dependentes da água, como a agricultura e a recarga de aquíferos, especialmente durante os períodos de estiagem. A combinação entre

a variabilidade térmica e a elevada evapotranspiração potencializa os efeitos das secas e amplia a vulnerabilidade ambiental da região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo realizar uma caracterização hidrológica do Pegmatito Alto do Patrimônio, inserida na Província Pegmatítica da Borborema. A partir do processo de correção e validação dos dados, foi possível confirmar que se trata de uma região com elevada variabilidade pluviométrica ao longo das últimas décadas. Os resultados indicam que os meses de março e abril concentram os maiores volumes de precipitação na região, enquanto o período de agosto a novembro é caracterizado por níveis pluviométricos praticamente nulos, o que reflete a sazonalidade típica das áreas semiáridas. A distribuição da precipitação média anual revelou-se bastante heterogênea, com valores variando entre aproximadamente 400 mm e mais de 700 mm, evidenciando a influência de fatores locais sobre o regime de chuvas.

Do ponto de vista interanual, o período de 2014 a 2018 destacou-se como o mais seco dos últimos 30 anos, acarretando sérias consequências para a população local, especialmente em termos de segurança hídrica, produção agrícola e abastecimento de água. A partir da abordagem adotada, foi possível realizar uma caracterização pluviométrica abrangente da região, evidenciando padrões espaciais e temporais relevantes para o entendimento da dinâmica climática local.

A identificação da sazonalidade e da variabilidade pluviométrica ao longo do tempo é fundamental para o planejamento de atividades dependentes da disponibilidade hídrica, como a agricultura, o manejo de recursos hídricos e a gestão de eventos hidrometeorológicos extremos. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos relevantes para o planejamento hídrico e contribuem

para a gestão sustentável dos recursos hídricos em uma região de expressiva importância ambiental e econômica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, Brasil, pelo apoio financeiro, por meio do Código de Financiamento 001. Também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Brasil, pelo suporte concedido por meio dos seguintes projetos: 313358/2021-4, 309330/2021-1 e 443905/2023-1.

REFERÊNCIAS

- ALVARES; C. A.; STAPE; J. L.; SENTELHAS; P. C.; GONÇALVES; J. D. M.; Sparovek; G. Köppen's Climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANA (2010). Bacia do rio Piranhas-Açu. *Agência Nacional de Águas – ANA*. Consultado em 22 de setembro de 2015.
- BERNARDINO; D. S. M.; de Menezes; E. H. S.; dos Santos; J. Y. G.; DINIZ; M. T. M.; DO NASCIMENTO, M.A.L. Land Use and Land Cover in the Territory of Seridó UNESCO Global Geopark, Northeast Brazil. *Geoheritage*, v. 15, n. 62, 2023.
- DA SILVA, R. M.; SILVA, J. F. C. B. C.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, A. M.; BRASIL Neto, R. M. Spatial distribution and estimation of rainfall trends and erosivity in the Epitácio Pessoa reservoir catchment, Paraíba - Brazil. *Natural Hazards*, v. 102, p. 829-849, 2020.
- DA SILVA, S. D. R.; FERREIRA, A. M.; LUCENA, R. L.; MARINHO, G. S. Níveis de insolação no Seridó Potiguar e suas implicações: O caso de Caicó/RN. *Revista Geonorte*, v. 2, n. 5, Edição Especial, p. 800-812, 2012.

Da SILVA; M. R. R.; Höll; R.; Beurlen; H. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, n. 3-4, p. 355-364, 1995.

DANTAS, J. C.; SILVA, R. M. Notas sobre a centralidade dos açudes para a gestão da água no semiárido brasileiro. **Geografia em Atos**, v. 1, p. 78-103, 2019.

Diniz, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P.; MAIA, R. P.; FERREIRA, B. Mapeamento geomorfológico do estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18 n. 4, p. 689-701, 2017.

DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C. Climatologia do Rio Grande do Norte: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 488-506, 2015.

DO NASCIMENTO; M. A. L.; DA SILVA; M. L. N.; DE ALMEIDA; M. C.; COSTA; S. S. S. Evaluation of Typologies, Use Values, Degradation Risk, and Relevance of the Seridó Aspiring UNESCO Geopark Geosites, Northeast Brazil. **Geoheritage**, v. 13, n. 25, 2021.

GADELHA; A. N.; COELHO; V. H. R.; XAVIER; A. C.; BARBOSA; L. R.; MELO; D. C. D.; Xuan; Y.; Huffman; G. J.; Petersen; W. A.; Almeida, C. N. Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. **Atmospheric Research**, v. 218, p. 231– 244, 2019.

Governo da Paraíba. **Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba: relatório executivo**. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, 2022.

Governo do Rio Grande do Norte. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (PERH-RN)**. Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte, 2022.

HERDIES, D. L., DIAS, P. L. S., CHOU, S. C. Moisture budget of the bimodal rainfall regime in equatorial Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, D20, 2002.

- LISBOA, V. A. C.; MACEDO, J. C. A.; PEREIRA, A. R. S.; NOBERTO, L. V.; GALDINO, M. P. Aspectos da geologia e mineralogia do Pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema. **Estudos Geológicos**, v. 33, n. 1, p. 119-136, 2023.
- MISHRA, M.; SUDARSAN, D.; CHAND, P.; PAUL, S.; DOFEE, A. A.; DA SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. C.; GURIA, R.; SANTOS, C. A. G. Exploring global trends and future research directions in shoreline analysis Systems (SAS): A bibliometric analysis. **Journal of Coastal Conservation**, v. 29, p. 345, 2025.
- NASCIMENTO, J. M.; FRADE, T. G.; SILVA, R. M. Modelagem da resposta do escoamento em uma bacia do semiárido da Paraíba utilizando o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, p. 1137-1150, 2018.
- REBOITA, M. S., RODRIGUES, M., SILVA, L. F., ALVES, M. A. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6, 2010.
- RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P.; XAVIER, R. A.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, R. M. Geomorphic changes in river styles in a typical catchment of the Brazilian semiarid region. **Catena**, v. 232, p. 856, 2023.
- SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; PASSOS, J. S. A.; DA SILVA, R. M. Drought assessment using a TRMM-derived standardized precipitation index for the upper São Francisco River basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, p. 250-278, 2017.
- Silva, A. M., Silva, R. M., Santos, C. A. G. Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 79, n. 1, p. 1-11, 2019.
- SILVA, R. M.; Santos, Celso A. G.; Maranhão, K. U. A.; Silva, A. M.; de Lima, V. R., P. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. **Earth Sciences Research Journal**, v. 22, p. 175-186, 2018.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). Modelos Hidrológicos. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p.

PARTE II

MINERAÇÃO E AGRICULTURA FAMILIAR NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO



CAPÍTULO 5

ESTUDOS SOBRE MINÉRIOS NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Ianna Maria Sodré Ferreira de Sousa¹

INTRODUÇÃO

A **Província Pegmatítica da Borborema (PPB)** é uma região geológica de destaque no Nordeste do Brasil, abrangendo áreas dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Inserida no contexto da Faixa Seridó, esta província estende-se por aproximadamente 75 km de largura e 150 km de comprimento, com orientação Nordeste-Sudoeste (De Albuquerque *et al.*, 2020; Lira *et al.*, 2016).

Geologicamente, a província é composta por numerosos corpos de pegmatitos graníticos, conhecidos por sua riqueza em minerais industriais e metálicos. Esses pegmatitos são fontes de minerais como columbita-tantalita, berilo, espodumênio e feldspato, além de variedades gemológicas de turmalina, água-marinha e quartzo. A diversidade mineralógica e o potencial econômico desses depósitos conferem à região uma importância significativa no cenário mineral brasileiro (Lira *et al.*, 2016; Soares *et al.*, 2018).

¹ Doutora pelo Curso Ciência da Computação da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Professor(a) do Departamento de Informática (IFPB Campina Grande).ianna@ifpb.edu.br

A Província Pegmatítica da Borborema configura-se, portanto, como uma região de notável relevância geológica e econômica, distinguindo-se pela diversidade e abundância de minerais de interesse industrial e gemológico. Essa expressiva riqueza mineral tem motivado, ao longo do tempo, a realização de numerosos estudos científicos, conduzidos sobre diferentes enfoques e abordagens multidisciplinares.

Por essa razão, uma revisão sistemática da literatura, ao levantar o estado da arte, pode contribuir para a organização de conhecimentos, identificando como a região tem sido estudada, visando nortear trabalhos futuros. Este trabalho tem por objetivo responder as seguintes perguntas: QP1: “Quais minérios têm sido estudados na Província Pegmatítica da Borborema?” e QP2: “Quais perspectivas têm sido abordados os estudos de minérios na Província Pegmatítica da Borborema?”.

METODOLOGIA

Para se obter uma visão mais abrangente e confiável sobre os trabalhos já produzidos em um campo específico, pode-se utilizar a **Revisão Sistemática da Literatura (RSL)**, um método rigoroso e estruturado de coleta, avaliação e síntese de estudos científicos sobre determinado tema, guiado por **questões de pesquisa específicas e previamente definidas** (Kitchenham *et al.*, 2007). Ainda segundo os autores, a RSL distingue dois tipos principais de estudos: os **Estudos Primários (EP)**, que geram resultados empíricos e compõem a base da revisão; e os **Estudos Secundários (ES)**, que se fundamentam em EP para realizar análises e extrações de conhecimento mais abrangentes.

Neste contexto, a pesquisa foi conduzida por meio de uma **Revisão Sistemática da Literatura (RSL)** baseada em estudos primários publicados sobre **minérios na Província Pegmatítica da**

Borborema, no período de 1º de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2024.

Outrossim, este trabalho adotou uma abordagem **qualitativa e quantitativa** no tratamento dos dados, combinando **técnicas de análise de conteúdo** aplicadas às informações descritivas com **procedimentos estatísticos** utilizados para examinar dados numéricos.

A RSL foi dividida em 3 fases. A Fase 1 consistiu na definição da string de busca a partir da palavra-chave e suas equivalentes dentro da temática da pesquisa, a qual foi aplicada como filtro para formar a base de artigos: “Província Pegmatítica da Borborema” OR “Minérios na Província Pegmatítica da Borborema” OR Minerals in the Borborema Pegmatite Province OR Minerals in the “Pegmatite Province of Borborema”. Foram realizadas buscas nas bases Research Gate² e Periódicos da Capes³, e também no buscador Google Acadêmico⁴.

Ato contínuo, a base inicial (1053 resultados) foi filtrada segundo critérios de inclusão e exclusão (ver Quadro 1). O resultado dessa fase foram 488 trabalhos elegíveis.

Quadro 1 - Relação dos critérios de inclusão e exclusão de trabalhos

| Critérios de inclusão | Critérios de exclusão |
|--|---|
| 1. Trabalhos publicados entre 1 de janeiro de 2014 e 31 de dezembro de 2024, inclusive; 2. Trabalhos que falem sobre minérios na Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil; 3. Trabalhos publicados em português ou inglês; | 1. Trabalhos duplicados 2. Não abordasse a área da Província Pegmatítica da Borborema; 3. Trabalhos sem relação com minérios na área da Província Pegmatítica da Borborema; 4. Trabalhos que não foram publicados no período estabelecido; |

2 <https://www.researchgate.net/>

3 <https://www.periodicos.capes.gov.br/>

4 <https://scholar.google.com.br/?hl=pt>

| | |
|-------------------------------------|--|
| 5. Trabalhos com mais de 4 páginas; | 7. Trabalhos com menos de 4 páginas; |
| 6. Trabalhos disponíveis online. | 8. Dissertações e/ou teses e/ou relatórios técnicos e/ou livros. |

Fonte: Própria.

A Fase 2 consistiu em aplicar novamente os critérios estabelecidos no Quadro 1, acrescentando a leitura superficial dos trabalhos, isto é, leitura dos resumos e a verificação se a área de estudo era de fato a Província Pegmatítica da Borborema. Na conclusão dessa fase, 119 trabalhos foram elegíveis.

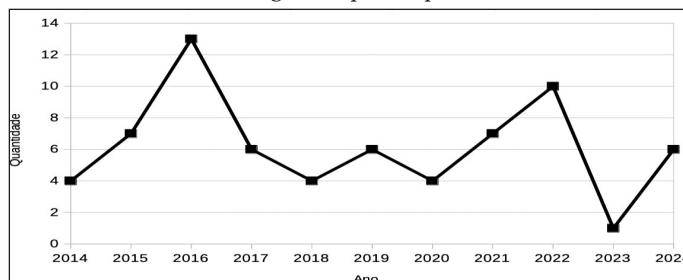
A Fase 3 consistiu em uma leitura mais aprofundada dos trabalhos selecionados, com ênfase nas seções de introdução e conclusão, permitindo uma análise mais precisa quanto às abordagens adotadas em cada estudo. Ao final dessa etapa, foram aprovados 68 trabalhos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da pesquisa nas bases ResearchGate, Periódicos da Capes, e Google Acadêmico, foram encontrados 1053 resultados ao todo para o período especificado. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, ocorreu a primeira filtragem dos trabalhos, resultando em 488 artigos. Destes, 119 se tornaram elegíveis para a última fase. Por fim, obteve-se um total de 68 artigos aprovados de acordo com o Quadro 1.

O Gráfico 1 apresenta a quantidade de artigos compilados anualmente no período de 01 de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2024. Observa-se que o número de artigos varia ao longo dos anos, sendo o ano de 2016 o que registrou o maior volume de compilações (13 artigos). Nos demais anos, a quantidade oscilou entre 1 e 10 artigos, destacando-se os anos de 2022 (10 artigos) e 2015 e 2021 (7 artigos cada), com uma queda significativa em 2023 (apenas 1 artigo compilado).

Gráfico 1- Quantidade de artigos compilados por ano. Período: 2014 a 2024



Fonte: Própria.

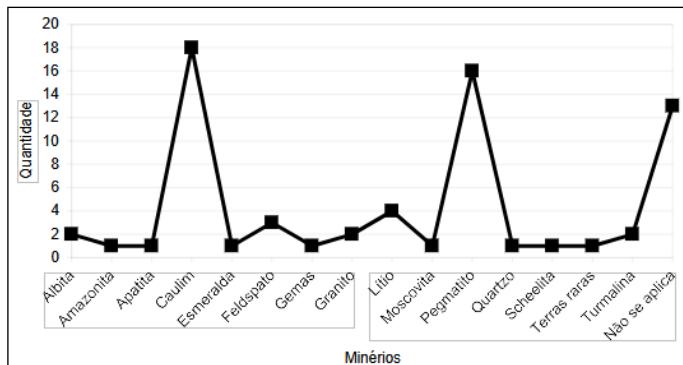
Considerando os 68 artigos, os resultados para as perguntas norteadoras dessa pesquisa, são apresentados a seguir.

QP1: Quais minérios têm sido estudados na Província Pegmatítica da Borborema?

O Gráfico 2 apresenta a distribuição dos minérios abordados nas publicações analisadas. O **caulim** é o minério mais frequentemente citado, com 18 ocorrências, seguido de **pegmatito**, com 16, e **lítio**, com 4. Outros minérios, como **feldspato** (3), **albita** (2), **granito** (2) e **turmalina** (2), também apresentam presença significativa. Os demais minérios aparecem com apenas uma menção. Destaca-se ainda a categoria “**Não se aplica**”, com 13 registros, indicando os casos em que o estudo não estava vinculado a um minério específico.

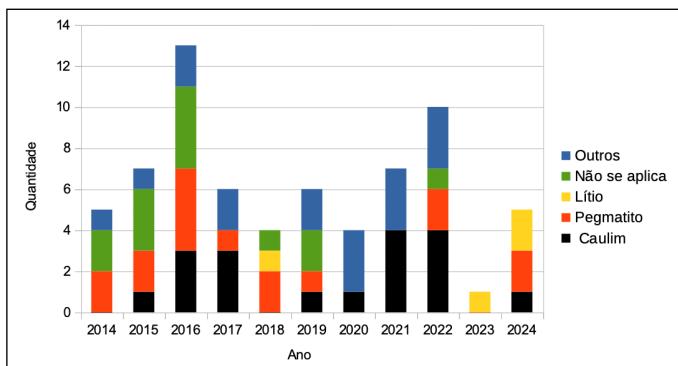
O Gráfico 3 ilustra a evolução temporal das publicações sobre minérios mais frequentes, organizadas por tipo de minério. Verifica-se que a partir de 2021, há um aumento na diversidade de minérios abordados, com destaque para a inserção mais expressiva de estudos sobre **lítio** nos anos mais recentes (2023 e 2024), refletindo possíveis mudanças de interesse ou demanda no setor mineral.

Gráfico 2 - Distribuição dos minérios estudados nas publicações. Período: 2014 a 2024



Fonte: Própria.

Gráfico 3 - Distribuição dos minérios mais estudados nas publicações por ano



Fonte: Própria.

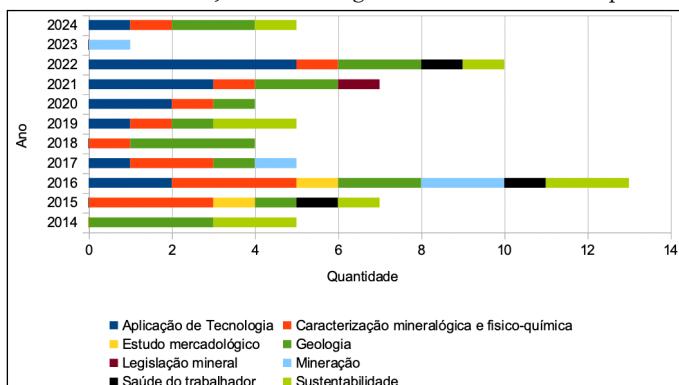
QP2: Sob quais perspectivas têm sido abordado o estudo de minérios na Província Pegmatítica da Borborema?

O Quadro 2 apresenta as principais perspectivas adotadas nos estudos sobre minérios na Província Pegmatítica da Borborema. Dentre os 68 artigos analisados, observa-se predominância das

abordagens voltadas à **geologia** (18), à **aplicação de tecnologia** (17) e à **caracterização mineralógica e fisico-química** (14), evidenciando uma ênfase técnico-científica nas pesquisas. Perspectivas relacionadas à **sustentabilidade** (9), **mineração** (4) e **saúde do trabalhador** (3) também se fazem presentes, embora em menor proporção. Abordagens voltadas à **legislação mineral** e ao **estudo mercadológico** são pontuais, com 1 e 2 registros, respectivamente.

O Gráfico 4 apresenta a evolução temporal das abordagens adotadas nos estudos sobre minérios na Província Pegmatítica da Borborema, entre 2014 e 2024. Ao longo do período analisado, observa-se uma predominância das abordagens voltadas à **geologia**, à **aplicação de tecnologia** e à **caracterização mineralógica e fisico-química**. Juntas representam a maior parte dos estudos realizados.

Gráfico 4 - Distribuição das abordagens adotadas nos estudos por ano



Fonte: Própria.

O ano de 2016 se destacou com o maior número de publicações (13), evidenciando uma maior diversidade de enfoques, especialmente nas áreas de **geologia**, **caracterização mineralógica** e **mineração**. A partir de 2020, há uma redução geral no volume de

publicações, embora temas como **aplicação de tecnologia e geologia** ainda se mantenham presentes.

Questões como **sustentabilidade e saúde do trabalhador** também aparecem ao longo da série temporal, embora com menor frequência, sugerindo um interesse crescente, porém ainda limitado, por aspectos sociais e ambientais da atividade mineral. O tema **legislação mineral** aparece de forma pontual, reforçando a necessidade de maior atenção a esse eixo em estudos futuros. O tema **estudo mercadológico** foi pouco abordado (apenas em dois anos com 2 trabalhos ao todo) e o tema **mineração** despertou pouco interesse, aparecendo nos anos 2016 e 2017, ressurgindo em 2023.

Quadro 2 - Distribuição dos temas abordados nos artigos compilados. Período:
1/1/2014 a 31/12/2024

| Objeto do estudo | Quantidade | Publicação |
|--|------------|--|
| Aplicação de Tecnologia | 17 | ALMEIDA, VIDAL E SANTOS, 2019; ATAÍDE E LEANDRO, 2017; DA SILVA FERREIRA, 2020; DA SILVA E VIEIRA, 2021; DA SILVA, 2020; DE SOUSA E DE NASCIMENTO, 2016; LEANDRO <i>et al.</i> , 2017; LEANDRO E VIEIRA, 2022; MEDEIROS <i>et al.</i> 2022; NUNES <i>et al.</i> , 2019; ROQUE, LISBOA E FRANCA, 2024; SANTANA <i>et al.</i> 2021; SANTANA <i>et al.</i> , 2022; SILVA E BRUM, 2022; SOUSA <i>et al.</i> , 2021; TARDIF <i>et al.</i> , 2022; VIEIRA, FERREIRA E VIDAL, 2016; |
| Caracterização mineralógica e físico-química | 14 | BEURLEN <i>et al.</i> , 2019; CAMPOS E BERTOLINO, 2017; DE MEDEIROS <i>et al.</i> , 2020; DE OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2017; FERREIRA <i>et al.</i> , 2022; GENUÍNO, SANTOS E VIEIRA, 2015; LIRA <i>et al.</i> , 2016; MEDEIROS, GONZAGA E OLIVEIRA, 2015; MEYER <i>et al.</i> , 2016; NOGUEIRA, OLIVEIRA E BERTOLINO, 2024; SANTANA, VIEIRA E VIDAL, 2016; SANTOS, OLIVEIRA E FILIPO, 2018; SPACOV <i>et al.</i> , 2015; SPACOV <i>et al.</i> , 2021 |
| Estudo mercadológico | 2 | DE LIMA <i>et al.</i> , 2016; GONÇALVES E CÂNDIDO, 2015 |

| Objeto do estudo | Quantidade | Publicação |
|----------------------|------------|--|
| Geologia | 18 | BEURLEN <i>et al.</i> , 2016; BEURLEN <i>et al.</i> , 2018; DA SILVA ARAÚJO, LISBOA E DOS SANTOS OLIVEIRA, 2017; DE ALBUQUERQUE <i>et al.</i> , 2020; DE ARAÚJO NETO, DE LIRA SANTOS E SANTOS, 2021; DE AZEVEDO GUIMARÃES <i>et al.</i> , 2024; DE LIRA SANTOS <i>et al.</i> , 2016; DE MEDEIROS <i>et al.</i> , 2024; DE OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2022; DE SOUZA <i>et al.</i> , 2022; FERREIRA <i>et al.</i> , 2014; FERREIRA, LIMA E SOARES, 2014; LISBOA <i>et al.</i> , 2024; SALES, 2021; SANTOS, SALES E VIEIRA, 2015; SANTOS <i>et al.</i> , 2018; SOARES <i>et al.</i> , 2018; STRMIĆ PALINKAŠ <i>et al.</i> , 2019 |
| Legislação mineral | 1 | DO NASCIMENTO SILVA E SOARES, 2021 |
| Mineração | 4 | DANTAS <i>et al.</i> , 2016; DE ARAÚJO <i>et al.</i> , 2017; DE OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2023; SOARES, 2016 |
| Saúde do trabalhador | 3 | DE MEDEIROS RODRIGUES E MACHADO, 2022; DE SOUSA <i>et al.</i> , 2016; NUNES ALVES DE SOUSA <i>et al.</i> , 2015 |
| Sustentabilidade | 9 | DA COSTA BARROS <i>et al.</i> , 2015; DA SILVA SANTOS <i>et al.</i> , 2024; DANTAS E FREITAS, 2014; DE ARAÚJO MAIA <i>et al.</i> , 2019; DE LUCENA PEREIRA, DE SOUSA E VIDAL, 2022; DE NEGREIROS MOREIRA <i>et al.</i> , 2016; LACERDA <i>et al.</i> , 2014; MEDEIROS <i>et al.</i> , 2019; MEYER <i>et al.</i> , 2016 |

Fonte: Própria.

Em suma, o Quadro 2 revela tendências temáticas que variam ao longo dos anos, refletindo tanto os interesses científicos quanto os contextos socioeconômicos e tecnológicos que influenciam a pesquisa sobre minérios na região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente Revisão Sistemática da Literatura (RSL) possibilitou a identificação, classificação e análise crítica dos estudos publicados sobre minérios na Província Pegmatítica da Borborema (PPB) no período compreendido entre 2014 e 2024. Os resultados

evidenciam a relevância geológica e econômica da PPB, cuja expressiva diversidade mineralógica – destacando-se o caulim, o pegmatito e, mais recentemente, o lítio – reforça seu protagonismo no cenário da mineração brasileira, especialmente na região Nordeste.

A distribuição temporal das publicações revelou o ano de 2016 como o de maior produtividade científica, possivelmente em decorrência de iniciativas institucionais ou setoriais voltadas ao fomento da pesquisa mineral. A partir de 2021, observou-se uma ampliação da variedade de minérios abordados, refletindo mudanças nas prioridades investigativas e nas dinâmicas de mercado, como no caso do lítio, cuja presença mais expressiva nas publicações mais recentes pode estar atrelada ao aumento da demanda global por fontes energéticas alternativas e tecnologias sustentáveis.

No tocante às abordagens analíticas adotadas, nota-se uma preponderância de estudos com ênfase em aspectos geológicos, aplicação de tecnologias e caracterização mineralógica e físico-química, o que sugere um predomínio de investigações de cunho técnico-científico. Abordagens de natureza socioambiental, como aquelas relacionadas à sustentabilidade, saúde do trabalhador e legislação mineral, foram significativamente menos recorrentes, revelando um desequilíbrio temático que aponta para oportunidades de aprofundamento em futuras agendas de pesquisa.

Neste sentido, os achados desta RSL fornecem subsídios relevantes para o mapeamento do conhecimento científico produzido sobre a PPB, além de contribuírem para a identificação de lacunas temáticas e epistemológicas. Recomenda-se, portanto, a ampliação dos estudos interdisciplinares que considerem os impactos sociais, ambientais, legais e econômicos da atividade mineral na região, promovendo uma abordagem mais integrada e alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, K. M.; VIDAL, F. W. H.; SANTOS, C. A. M. **Melhora do beneficiamento de caulim do Seridó utilizando um classificador hidrociclone.** In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2019, Belo Horizonte-MG, 4 a 8 de Novembro de 2019.
- ATAIDE, T. N.; LEANDRO, A. P. **Hidrociclonagem e análise granulométrica do rejeito de caulim da província pegmatítica da Borborema.** In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, v. 27, 2017, Belém-PA, 23 a 27 de outubro 2017.
- BEURLEN, HARTMUT *et al.* Evaluation of the potential for Rare Earth Element (REE) deposits related to the Borborema Pegmatite Province in Northeastern Brazil. **Estudos Geológicos**, v. 29, n. 2, p. 40-53, 2019.
- BEURLEN, HARTMUT *et al.* Mg-Rich Mica and Tourmaline in Pink-Colored “Parelhas Quartzite” Intercalations in the Ecuador Formation, Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil: Record of Evaporitic Protolith?. **Estudos Geológicos**, v. 26, n. 1, p. 117- 134, 2016.
- BEURLEN, HARTMUT *et al.* Nigerite Group “Zinconigerite-(6n6s)” Variety In The Roncadeira Pegmatite, Nova Palmeira-County State of Paraíba, Borborema Province, NE-BRAZIL. **Estudos Geológicos**, v. 28, n. 1, p. 35-55, 2018.
- CAMPOS, V. M. J. S.; BERTOLINO, L. C. **Caracterização mineralógica, química, e beneficiamento do caulim de Equador (RN) e Junco do Seridó (PB).** In: XXV JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E I JORNADA DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 2017, Rio de Janeiro – RJ, 25 e 27 de julho de 2017.
- DA COSTA BARROS, PAULO SALES *et al.* Análise preliminar, implicações ao meio físico e proposta de utilização da educação ambiental como instrumento de gestão ambiental nas atividades mineradoras de pequeno porte em uma porção da Província Pegmatítica do Seridó

Paraibano, município de Picuí – PB. **Revista do CERES**, v. 1, n. 2, p. 225-231, 2015.

DA SILVA ARAÚJO, P. J.; LISBOA, V. A. C.; DOS SANTOS OLIVEIRA, J. R. Mapeamento geológico do Pegmatito Alto do Tibiri: aspectos estruturais e mineralógicos. **Revista Principia**, n. 33, p. 29-36, 2017.

DA SILVA FERREIRA, G. F. Dimensionamento dos britadores da cooperativa dos garimpeiros de Pedra Lavrada-PB. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 3, p. 205-222, 2020.

DA SILVA SANTOS, E. *et al.* Mineração de caulim: práticas socioambientais na busca da sustentabilidade. **Caderno Impacto em Extensão**, v. 5, n. 2 (2024): XVII ENEX - Extensão Universitária, Arte e Cultura: desafios e caminhos possíveis para indissociabilidade entre Ensino, Pesquisa e Extensão.

DA SILVA, G. F. Determinação de uma peneira para aplicação no processo de cominuição de pegmatitos do Alto Serra Branca-PB. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 4, p. 206-222, 2020.

DA SILVA, G. F.; VIERA, E. V. Redimensionamento do moinho de bolas de seixos da cooperativa dos garimpeiros de Pedra Lavrada/PB. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 13, n. 2, p. 71-84, 2021.

DANTAS, F. A.; FREITAS, L. S. Sustentabilidade da indústria mineral no município de Pedra Lavrada-PB: um estudo a partir do uso do ISM-Índice de Sustentabilidade da Mineração. **Revista Universo Contábil**, v. 10, n. 2, p. 144-160, 2014.

DANTAS, J. *et al.* A trajetória da mineração no Seridó Paraibano. In: CONIDIS- INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO. **Anais...** Campina Grande, 2016. p. 2-12.

DE ALBUQUERQUE, I. M. B. *et al.* A mineralogia acessória do Amazonita Pegmatito Serra Branca: classificação de um pegmatito NYF na Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 20, n. 3, p. 47-61, 2020.

DE ARAÚJO MAIA, Y. W. *et al.* Produção mineral no seridó (PB/RN) e seus impactos ambientais. In: 2o CONGRESSO SUL-AMERICANO

DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE. 2019, Foz de Iguaçu-PR.

DE ARAÚJO NETO, J. F.; DE LIRA SANTOS, L. C. M.; SANTOS, G. L. Geologia e aspectos genéticos de depósitos de esmeralda em zonas de cisalhamento: um olhar sobre os depósitos esmeraldíferos da Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 21, n. 2, p. 19-39, 2021.

DE ARAÚJO, A. C. V. *et al.* Análise das tensões de alívios em blocos para rochas ornamentais: são marcos e dos pegmatóides golden, exotic e capuccino. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 14, n. 1, p. 90-97, 2017.

DE AZEVÊDO GUIMARÃES, A. N. *et al.* Estudo de uma ocorrência cuprífera associada a pegmatito e skarn na região do “Domo da Coruja”, Parelhas/RN. **Estudos Geológicos**, v. 34, n. 2, p. 1-26, 2024.

DE LIMA, M. P. *et al.* Aspectos econômicos da lavra integral do pegmatito Alto da Serra Branca. In: IV SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE. **Anais...** João Pessoa-PB, 2016. p. 38-46.

DE LIRA SANTOS, L. C. M. *et al.* Condicionamento estrutural e mapeamento geológico de detalhe dos pegmatitos Alto do Feio e Alto Serra Branca, região de Pedra Lavrada (PB), Província Pegmatítica do Seridó, NE do Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 26, n.1, p. 98-116, 2016.

DE LUCENA PEREIRA, H.; DE SOUSA, A. P. F.; VIDAL, F. W. H. Contexto produtivo do caulim de galho branco em Equador, RN. **HOLOS**, v. 8, p. 1-15, 2022.

DE MEDEIROS RODRIGUES, M. H.; MACHADO, T. A.. “Garimpeiros-campões” em Frei Martinho-PB: circuitos espaciais de produção e precarização do trabalho. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM GEOGRAFIA. **Anais...** Palmas-TO, 2022.

DE MEDEIROS, A. R. S. *et al.* Análise granulométrica e DRX para caracterização do rejeito de caulin da região do Seridó da Paraíba visando uma nova rota de beneficiamento. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 33575-33588, 2020.

DE MEDEIROS, K. S. *et al.* Gênese e evolução do inselberg monte do gallo, seridó geoparque mundial da Unesco, Nordeste do Brasil. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA (SBGFA) & IV ENCONTRO LUSO-AFRO- AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA E AMBIENTE (ELAAGFA). **Anais...** João Pessoa-PB, 2024.

DE NEGREIROS MOREIRA, E. I. *et al.* Desafios para a mineração de pequeno porte no semiárido nordestino, Paraíba e Rio Grande do Norte - Província Pegmatítica da Borborema-Seridó. In: I CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO. **Anais...** Campina Grande-PB, 2016, p.1-6.

DE OLIVEIRA, D. S. *et al.* Extração de lítio do mineral do tipo espodumênio: uma revisão bibliográfica. In: 21º ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, DE MATERIAIS E DE MINAS, parte integrante da ABM Week 7ª edição. **Anais...** São Paulo-SP, 2023, p. 1-9.

DE OLIVEIRA, J. V. D. *et al.* Mapeamento geológico do Pegmatito Alto do Calango, Província Pegmatítica da Borborema. **Revista Principia**, v. 59, n. 4, p. 1262-1277, 2022.

DE OLIVEIRA, P. J. A. *et al.* Espectroscopia de refletância aplicada à caracterização de turmalinas gemológicas provenientes da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. **Anais...** Santos-SP, 2017, p. 1754-1761.

DE SOUSA, J. B. M.; DO NASCIMENTO, P. H. M. Análise de massa específica aparente na produção de porcelanato utilizando resíduos de Caulim e Granito sinterizados à temperatura de 1200ºC. In: **XIII CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS.** [sn], Minas Gerais, setembro, 2016.

DE SOUSA, M. N. A. *et al.* Correlação entre qualidade de vida e distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho em mineiros. **Revista Brasileira de Qualidade de Vida**, v. 8, n. 1, p. 70-84, 2016.

DE SOUZA, S. R. C. *et al.* Field Trip Guide to the SERIDÓ Pegmatite Province. **Estudios Geologicos-Madrid**, v. 32, n. 2, p. 21-36, 2022.

DO NASCIMENTO SILVA, E.; SOARES, I. A. Extração mineral de caulim: legislação, processo produtivo e impactos ambientais. **Revista Geotemas**, v. 11, 2021.

FERREIRA, A. C. M. *et al.* Vesuvianita violeta gemológica do skarn de Umbuzeiro Doce, Província Scheelítífera da Borborema, Nordeste do Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 24, n. 1, p. 31-41, 2014.

FERREIRA, A. C. M.; LIMA, R. J. da S.; SOARES, D. R.. Dados preliminares da estrutura cristalina da gahnita gemológica do pegmatito Alto Mirador, Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 24, n1, p. 23-30, 2014.

FERREIRA, D. D. de A. *et al.* Estudo da mineralogia acessória do pegmatito Alto do Calango, Faixa Seridó, Nordeste do Brasil. 2022. IN: **XXIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA (ENTMME)**. Anais... Armação dos Búzios-RJ, 2022.

GENUÍNO, V. A.; SANTOS, L. C. M. L.; VIEIRA, F. F. Aspectos Geológicos, Mineralógicos e Estruturais do Pegmatito Alto do Feio (Pedra Lavrada-PB): contribuição para modelos prospectivos em corpos pegmatíticos no Nordeste do Brasil. **Ambiente Mineral – Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente**, v. 5, n. 2, p. 21-31, 2015.

GONÇALVES, A. T. P.; CÂNDIDO, G. A. Análise da Obtenção de vantagens competitivas para Arranjos Produtivos Locais: Um estudo exploratório no setor de extração mineral do Estado da Paraíba. **Revista Gestão Industrial**, v. 11, n. 4, 2015.

KITCHENHAM, B. *et al.* Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering version 2.3. **Engineering**, v. 45, n. 4ve, p. 1051, 2007.

LACERDA, C. C. de O. *et al.* Análise da sustentabilidade no setor de mineração do município de Picuí-PB. In: **XVI ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA)**. Anais... São Paulo: USP, 2014.

LEANDRO, A. P. *et al.* Estudo do resíduo de caulim pegmatítico usado como ingrediente na formulação de cimento Portland. **HOLOS**, v. 6, p. 224-232, 2017.

- LEANDRO, A. P.; VIERA, E. V. Study of the dispersion of caulinite, in northeastern Brazil, through pH control and addition of dispersants. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 10, p. 65434-65455, 2022.
- LIRA, B. B. *et al.* Estudo dos pegmatitos da Província da Borborema-Paraíba: minerais e minérios de interesse tecnológico. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 13, n. 1, p. 113-119, 2016.
- LISBOA, V. A. C. *et al.* Aspectos da geologia e mineralogia do pegmatito Alto do Patrimônio, Província Pegmatítica da Borborema. **Estudios Geologicos-Madrid**, v. 33, n. 1, p. 119-136, 2024.
- MEDEIROS, A. R. S. de *et al.* Avaliação das variáveis de atrição para dispersão de caulim do tipo primário. In: **XXIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA (ENTMME). Anais...** Armação dos Búzios- RJ, 2022.
- MEDEIROS, A. R. S. *et al.* Avaliação dos impactos ambientais gerados pela pequena mineração no município de Picuí-PB. **Semiárido Brasileiro**, v. 2, p. 15, 2019.
- MEDEIROS, A. R. S.; GONZAGA, L. M.; OLIVEIRA, J. R. S. Caracterização química, granulométrica e mineralógica do rejeito proveniente do beneficiamento de moscovita. In: **XXVI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA. Anais...** Poços de Caldas-MG, 2015.
- MEYER, M. F. *et al.* Granulometria de argila caulim primário dos pegmatitos nas regiões do Junco do Seridó-PB e Equador-RN. In: **22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (CBECiMat)**. Natal-RN, 2016.
- MEYER, M. F. *et al.* Recuperação de áreas degradadas – estudo de caso: Armil mineração do Nordeste LTDA. In: **CONIDIS-INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO. Anais...** Campina Grande, 2016.
- NOGUEIRA, D. R. de S.; OLIVEIRA, A. L. B. de; BERTOLINO, L. C. Caracterização química e mineralógica do minério de lítio da Província Borborema. 2024. In: **XXXII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E VIII JORNADA DE INICIAÇÃO EM**

DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO.

Anais... Rio de Janeiro-RJ, p. 79-83, 2024.

NUNES ALVES DE SOUSA, M. *et al.* QUALIDADE DE VIDA DE TRABALHADORES INFORMAIS DA MINERAÇÃO. *Journal of Nursing UFPE/Revista de Enfermagem UFPE*, v. 9, n. 11, 2015.

NUNES, B. A. *et al.* Uso do rejeito de mineração para produção de microesferas de sinalização viária. In: I CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE E III CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO. *Anais...* Campina Grande-PB, 2019.

ROQUE, J. R. S.; LISBOA, V. A. C.; FRANCA, L. L. S. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para identificação de pegmatitos litiníferos no município de Frei Martinho (PB), província pegmatítica da Borborema. *Brazilian Journal of Development*, v. 10, n. 3, 2024.

SALES, M. da C.C. Petrografia dos Granitos Pegmatíticos da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2021, Brasília. *Anais...* Brasília-DF, 2021.

SANTANA, V. L. *et al.* Avaliação de um sistema de secagem solar para o beneficiamento de caulim: cobertura de policarbonato x cobertura de polipropileno. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 9, 2021.

SANTANA, V. L. *et al.* Secagem de caulim usando energia solar: avaliação da cobertura de policarbonato e cobertura de polipropileno para as condições climáticas de Campina Grande-PB. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 5, 2022.

SANTANA, V. L.; VIERA, E. V.; VIDAL, F. W. H. Caracterização do caulim de Equador/RN posterior ao processo de classificação em hidroclícone. 2016. In: IV SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIALIS DO NORDESTE. *Anais...* João Pessoa – PB, p. 508-566, 2016.

SANTOS, H. R. de O.; OLIVEIRA, D. R. S. de; FILLIPO, R. R. Identificação de minerais de lítio nos pegmatitos capoeira e do alemão, município de Parelhas/RN. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFRN. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2018.

SANTOS, L. M.; SALES, E. D. G.; VIEIRA, F. F. Revisitando o pegmatito Alto Serra Branca, município de Pedra Lavrada (PB): mapeamento geológico, aspectos de campo e zoneamento mineral. **HOLOS**, v. 8, p. 397-407, 2015.

SANTOS, R. Y. O. *et al.* Mapeamento geológico do Pegmatito Alto do Urubu, município de Picuí (PB), Faixa Seridó, Província Pegmatítica da Borborema. **Revista Principia**, n. 43, p. 222-233, 2018.

SILVA, G. F.; BRUM, I. Ensaios de cominuição de um feldspato albita da Província Pegmatítica da Borborema. In: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA (ENTMME). **Anais...** Armação dos Búzios- RJ, 2022.

SOARES, D. R. *et al.* Variedades gemológicas de minerais da província pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil: uma síntese. **Estudos Geológicos**, v. 28, n. 1, p. 56-71, 2018.

SOARES, D. R. Aspectos técnicos da lavra do pegmatito Alto do Feio, Pedra Lavrada, Paraíba. **Holos**, v. 1, p. 404-412, 2016.

SOUZA, A. P. F. *et al.* Aproveitamento do caulim e proposta para recuperação da área minerada no Sítio Galo Branco, Equador, RN. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, 2021.

SPACOV, I. C. G. *et al.* Dosimetria externa em minas de caulim na região do Seridó do Nordeste do Brasil. In: A construção civil: em uma perspectiva econômica, ambiental e social. **Editora Científica Digital**, 2021. p. 163-177.

SPACOV, I. C. G. *et al.* Monitoring of Radiation Levels in Mines of Kaolin Located in the Region Seridó-PB, Brazil. In: PROCEEDINGS OF THE XV WORKSHOP ON NUCLEAR PHYSICS AND IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NUCLEAR AND RELATED TECHNIQUES WONP-NURT'2015, p. 154-157, February 9-13, 2015, Havana, Cuba.

STRMIĆ PALINKAŠ, S. *et al.* Formation conditions and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ age of the gem- bearing Boqueirão granitic pegmatite, Parelhas, Rio Grande do Norte, Brazil. **Minerals**, v. 9, n. 4, p. 233, 2019.

TARDIF, D. *et al.* Capítulo 3 Mineralogia, Química e Tratamento de cor em Apatitas Gemológicas de Sumé, Paraíba, Brasil. In book: **Mineralogia e gemologia** [recurso eletrônico] / Flavia Compassi da Costa, Fabricia Benda de Oliveira, Ricardo Augusto Scholz Cipriano (organizadores.). Alegre, ES: CAUFES, 2022, p. 29-44.

VIERA, E. V.; FERREIRA, G. S.; VIDAL, F. W. H.. O beneficiamento de Feldspato na Província Pegmatítica da Borborema, Região Nordeste do Brasil. **Ambiente Mineral – Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente**, v. 6, n. 1, 2016.

CAPÍTULO 6

ESTOQUES REMANESCENTES DA MINERAÇÃO DA REGIÃO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Wandenbergs Bismarck Colaço Lima¹

Dwight Rodrigues Soares²

Alinne Marianne Martins Araújo³

Laércio Leal dos Santos⁴

José Lion Oliveira Julião⁵

INTRODUÇÃO

Os pegmatitos são rochas de expressiva importância econômica para os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, sendo responsáveis por grande parte da produção de gemas coradas, além de fornecerem minerais industriais essenciais para diversas cadeias

-
- 1 Doutor em Engenharia de Processos – UFCG. Professor do Curso Técnico em Mineração - IFPB, Campus Campina Grande, wandenbergs.lima@ifpb.edu.br
 - 2 Doutor em Geociências pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Professor do Curso Técnico em Mineração - IFPB, Campus Campina Grande dwight.soares@ifpb.edu.br;
 - 3 Doutorado em Engenharia Ambiental e Sanitária - UEPB, Campus Campina Grande alinne.marianne@gmail.com
 - 4 Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA/CCT/UEPB. laercioleal@servidor.uepb.edu.br;
 - 5 Engenheiro de Minas. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. lion.engminas@outlook.com

produtivas. Dentre esses minerais destacam-se: feldspato, caulim e quartzo, amplamente utilizados nas indústrias de cerâmica e vidro; berílio, tântalo, lítio, nióbio, estanho e quartzo, aplicados na metalurgia; muscovita e quartzo, usados na eletrônica; lítio, caulim e fosfato, voltados para a indústria química; e o quartzo com aplicações em óptica (Vidal, 2005). Além disso, os pegmatitos fornecem gemas e rochas ornamentais de valor agregado.

Do ponto de vista social, essas rochas também desempenham papel significativo, especialmente por serem exploradas de forma artesanal por garimpeiros. No entanto, a baixa tecnificação das atividades de lavra compromete o aproveitamento do potencial econômico, resultando em grandes volumes de rejeitos. A Província Pegmatítica da Borborema (PPB), localizada nos estados da

Paraíba e do Rio Grande do Norte, abriga uma concentração significativa de pegmatitos mineralizados, com destaque para os ricos em berilo e tantalita. Esses corpos foram historicamente denominados “pegmatitos berilo-tantalíferos” por Johnston Jr. (1945) e “pegmatitos tântalo-gluciníferos” por Rolff (1951). Scorz (1944) descreveu a PPB como uma província mineralógica composta por pegmatitos portadores de elementos raros, especialmente Be, Nb-Ta, Sn e Li.

Atualmente, a PPB segue ativa na extração de minerais industriais como feldspato, quartzo, mica, berílio, tantalatos de nióbio, cassiterita e caulinita, entre outros, sendo as gemas frequentemente extraídas como subprodutos ocasionais dessa atividade (Soares *et al.*, 2018).

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939–1945), a província alcançou notoriedade internacional pela produção estratégica de berilo e tantalita. Segundo Rolff (1946), o município de Picuí (PB) – que, à época, englobava também Pedra Lavrada e Nova Palmeira – chegou a responder por 20% da produção mundial de tantalita e entre 8% e 10% da produção de berilo, com cerca de 160 pegmatitos

sendo lavrados simultaneamente. A subárea Parelhas – Picuí se destacou como principal polo de produção (Johnston Jr., 1945). Essa expressiva atividade transformou a região em um ponto estratégico para o abastecimento de minerais críticos aos países aliados, fundamentais ao esforço de guerra (Soares, 2004).

Contudo, muitos dos pegmatitos da PPB são corpos de pequeno porte, o que inviabiliza grandes investimentos e favorece a exploração artesanal por garimpeiros, que atuam sem o uso de técnicas adequadas de lavra (Soares *et al.*, 2016). Essa prática é considerada predatória e de baixo rendimento (Ramos, 2017), ainda que, em escala global, a lavra artesanal de pegmatitos possa representar contribuição significativa na produção de determinadas commodities minerais (Černý, 1991).

Nos pegmatitos homogêneos, a lavra é realizada de forma integral, com desmontes completos do corpo e descarte dos minerais considerados não econômicos. Já os pegmatitos heterogêneos (zonados), mais valiosos economicamente, são lavrados prioritariamente na zona intermediária (zona III de Johnston Jr.), onde se concentram os minerais nobres, como nióbio-tantalatos, berilos e turmalinas coloridas. No entanto, segundo Moore (1945), essa metodologia de extração é extremamente agressiva ao meio ambiente e pouco eficiente, deixando considerável quantidade de minerais sem aproveitamento. Essa prática ainda persiste na região, em parte pela ausência de assistência técnica aos pequenos produtores.

Durante o auge da exploração na década de 1940, o foco era a produção de nióbio-tantalatos e berilos, o que levou ao acúmulo de grandes volumes de rejeitos com minerais economicamente valiosos não aproveitados. Dessa forma, torna-se urgente a realização de estudos sistemáticos sobre esses rejeitos, visando a sua viabilização industrial.

Desde o início do século XX, a lavra dos pegmatitos da PPB tem sido responsável pela obtenção de diversos minerais acessórios

de importância econômica, como berilo, cassiterita, tantalatos de nióbio, feldspatos e quartzo. Alguns minerais raros são obtidos de forma incidental e vendidos a atravessadores, que os comercializam para colecionadores ou museus ao redor do mundo.

Os rejeitos oriundos dessas lavras são constituídos principalmente por feldspato (ortoclásio), quartzo e minerais acessórios em menor proporção, como turmalinas negras, berilos, fosfatos e outros minerais raros. Apesar do potencial econômico de parte desse material, a dificuldade de separação manual leva ao seu descarte em grandes pilhas, que, por sua vez, comprometem o acesso às frentes de lavra e contribuem para problemas ambientais, como o alagamento das minas durante períodos chuvosos, por obstrução do escoamento natural das águas.

Há casos emblemáticos, como o do pegmatito Alto Feio no município de Pedra Lavrada na Paraíba, em que os rejeitos encobrem completamente o corpo mineralizado (Soares *et al.*, 2016). Estudos como os de Rolff (1951) mostram que, para se obter uma tonelada de tantalita, é necessário lavrar cerca de 4.000 toneladas de rocha pegmatítica. Em outras ocorrências, como o pegmatito Pedras Pretas-Seridinho, verificaram-se proporções de 1:2.000 (tantalita), 1:1.000 (cassiterita), 1:500 (berilo) e 1:120 (espodumênio), evidenciando a grande quantidade de rejeito gerado – que, historicamente, nunca foi reaproveitado industrialmente.

As rochas, em geral, apresentam uma composição mineralógica diversificada, contendo elementos que atuam como multinutrientes essenciais ao crescimento vegetal. No processo de rochagem, a liberação desses nutrientes para o solo ocorre de forma mais lenta em comparação com os fertilizantes químicos solúveis. No entanto, esse processo oferece uma disponibilização prolongada dos elementos nutritivos, resultante da ação do intemperismo, da atividade microbiológica e do manejo adequado do solo (Theodoro, 2020).

Figura 1 – Aspectos gerais do processo do aproveitamento dos pegmatitos na PPB: extração e carregamento nas minas (1), pátio de estocagem de blocos de pegmatito (2), pilha de mineral de quartzo rosa pré-selecionado (3) atividade garimpeira manual (4).



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Segundo a autora, a rochagem “fundamenta-se basicamente na busca pelo equilíbrio da fertilidade do solo, na conservação dos recursos naturais e na produtividade naturalmente sustentável”, sendo, portanto, uma prática alinhada aos princípios da agricultura regenerativa e do desenvolvimento sustentável.

O uso de remineralizadores minerais está regulamentado no Brasil pela lei no 12.890/2013, que permite sua comercialização no país. No processo de rochagem, são utilizados atualmente os mais diversos tipos de rochas: xistos, basaltos, granitos, granodioritos, anfibolitos, serpentinitos, pegmatitos, entre outros. De acordo com Theodoro (2020), estudos realizados em rochas do Brasil mostram que os melhores resultados para aplicação de rochagem são as de

origem vulcânica, principalmente basaltos, fornecendo principalmente cálcio, magnésio e sílica, e eventualmente potássio e fósforo.

As rochas pegmatíticas, devido à sua grande diversidade mineralógica, pois além de sua mineralogia essencial (quartzo, feldspatos e micas), podem conter minerais acessórios incluindo óxidos, sulfetos e sulfatos, fosfatos e silicatos, implicam em uma grande possibilidade de conter elementos nutrientes necessários à fertilização do solo (Belotti *et al.*, 2018).

Esses autores citados anteriormente, estudando pegmatitos do Estado de Minas Gerais sob a ótica da rochagem, concluíram que albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), quartzo (SiO_2), tridimita (SiO_2), gibbsita (Al(OH)_3) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) não apresentam nutrientes úteis para as plantas, enquanto que microclina (KAlSi_3O_8), muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO10(OH,F)}_2$), apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH,F,Cl})$), clorita ($(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O10(OH)}_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$), litiofilita (LiMn_2PO_4), entre outros, apresentam potencial para rochagem por incluírem em suas composições elementos como potássio (K), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg), manganês (Mn) e ferro (Fe). Os elementos K, Ca, P e Mg são macronutrientes para as plantas, ou seja, aqueles cujas concentrações no tecido vegetal são superiores a 1000 mg/kg (matéria seca vegetal), enquanto Mn e Fe são micronutrientes (com concentrações inferiores a 100 mg/kg).

A exploração dos pegmatitos na Província Pegmatítica da Borborema (PPB), realizada predominantemente por garimpeiros e sem o emprego de técnicas adequadas de lavra, resulta em baixo aproveitamento econômico e na geração de grandes volumes de rejeitos. No entanto, esse material residual apresenta elevado potencial de reaproveitamento industrial, especialmente no contexto da rochagem.

A utilização do pó de rochas pegmatíticas como remineralizador de solos representa uma alternativa viável e sustentável, contribuindo para o aumento da fertilidade dos solos e para a valorização de rejeitos atualmente descartados.

METODOLOGIA

A escolha do tema fundamentou-se em sua relevância econômica, abrangência geográfica e pertinência frente aos desafios atuais relacionados ao aproveitamento de rejeitos da mineração. Para o desenvolvimento deste capítulo, foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica, contemplando artigos científicos, teses, dissertações e resumos publicados em anais de eventos técnico-científicos, com o objetivo de estabelecer um embasamento teórico consistente.

Além da revisão de literatura, foram coletados dados de campo por meio de visitas técnicas a pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), bem como a áreas de lavra de granito destinadas ao uso ornamental, localizadas dentro da mesma província. Nessas visitas, observações sistemáticas e registros fotográficos contribuíram para o levantamento das condições atuais de exploração, disposição dos rejeitos e potencial de reaproveitamento mineral.

A redação deste capítulo seguiu os preceitos da linguagem científica, com uso de terminologia técnica adequada à área de estudo, observando-se as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aplicáveis à produção acadêmica.

RESULTADOS

Os dados obtidos evidenciaram um alto potencial de aproveitamento de rejeitos de extração de pegmatito e rochas ornamentais no processo de rochagem. Os resultados de análise das amostras de rejeito de pegmatito indicaram a presença de uma ampla variedade de minerais, notadamente aqueles que possuem elementos considerados nutrientes para as plantas como potássio (K), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg), manganês (Mn) e ferro (Fe). A análise dos dados, aliada a grande quantidade de rejeitos gerados nas áreas de extração de pegmatitos e rochas ornamentais, confirma a

viabilidade do aproveitamento desses materiais. Nesse sentido, os resultados aqui apresentados trazem contribuições relevantes, ao: i) apontar uma solução ambientalmente viável para a destinação dos rejeitos de pegmatito, que em sua maioria são descartados de forma inadequada em áreas de garimpo; ii) sugerir uma potencial nova fonte de renda para pequenos produtores e garimpeiros, por meio da comercialização dos rejeitos como insumo para a agricultura; e iii) indicar uma alternativa promissora como fonte de nutrientes para o solo, considerando a alta demanda brasileira por fertilizantes e nutrientes, uma vez que o país possui grande parte de seu território ocupado por solos com baixa fertilidade, que demandam o aporte de nutrientes para garantir boa produtividade agrícola. A seguir nas Tabelas 1A e 1B – apresenta-se a ocorrência de minerais metálicos e não metálicos na Província Pegmatítica da Borborema (PPB), com a situação atual dos garimpos nos estados da Paraíba (PB) e Rio Grande do Norte (RN), respectivamente.

Tabela 1A – Ocorrência de minerais nos municípios da Paraíba

| Município | Ocorrências | Minerais metálicos | Minerais não metálicos | Rocha | Situação |
|-----------------|-------------|--|----------------------------------|-----------|---|
| Cubati | 1 | berílio | feldspato, quartzo, mica | pegmatito | 1 garimpo inativo |
| Frei Martinho | 21 | berílio, nióbio, tântalo, tungstênio, bismuto | feldspato, quartzo, mica | pegmatito | 3 garimpos ativos e 18 inativos |
| Juazeirinho | 17 | berílio, nióbio, tântalo, turmalina | feldspato, quartzo, mica, caulim | pegmatito | 4 garimpos ativos e 13 inativos |
| Junco do Seridó | 44 | berílio, nióbio, tântalo, tungstênio, bismuto, estanho | feldspato, quartzo, mica, caulim | pegmatito | 6 garimpos ativos, 34 inativos e 4 minas ativas |
| Nova Palmeira | 36 | berílio, nióbio, tântalo, tungstênio, bismuto, estanho | feldspato, quartzo, mica | pegmatito | 36 inativos |
| Pedra Lavrada | 43 | berílio, nióbio, tântalo, tungstênio, bismuto, estanho | feldspato, quartzo, mica | pegmatito | 42 inativos e 1 ativo |

| | | | | | |
|-----------------------|----|--|--|----------------------|---|
| Picuí | 56 | berílio, nióbio, tântalo, tungstênio, bismuto, estanho | feldspato, quartzo, mica | pegmatito | 49 inativos e 7 ativos |
| Salgadinho | 20 | estanho, tungstênio. | feldspato, quartzo, mica, turmalina. | pegmatito | 16 ativos e 4 inativos |
| Santa Luzia | 67 | tungstênio, berílio, bário. | vermiculita, flúor, calcário, quartzo. | tactito, pegmatito | 56 garimpos inativos, 5 depósitos tungstênio, 1 mina inativa de flúor, 1 mina ativa de vermiculita. |
| São João do Sabugí | 17 | bário, tungstênio, ferro, berilo. | quartzo. | tactito, pegmatito e | 17 inativos e um depósito de ferro. |
| São Mamede | 66 | tungstênio, berílio, bário. | quartzo e fel-dspato. | tactito, pegmatito | 61 garimpos inativos e 5 depósitos de tungstênio |
| São Vicente do Seridó | 23 | berílio/nióbio/ tântalo; nióbio; tungstênio; bismuto. | quartzo, fel-dspato e cal-cário. | pegmatito/ tactito | 22 garimpos inativos e uma mina de quartzo. |
| Soledade | 2 | berilo | quartzo, fel-dspato, mica. | pegmatito | 2 garimpos inativos. |
| Várzea | 23 | tungstênio, bário e berilo | quartzo, fel-dspato, | tactito/ pegmatito | 22 garimpos inativos e 1 mina de tungstênio. |
| Salgadinho | 12 | - | turmalina | pegmatito | 12 garimpos ativos. |

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Tabela 1B – Ocorrência de minerais nos municípios do Rio Grande do Norte

| Município | Ocorrências | Minerais metálicos | Minerais não metálicos | Rocha | Situação |
|---------------------|-------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------|
| Acari | 22 | berílio, nióbio, tântalo, cassiterita | quartzo, feldspato | pegmatito | 16 ativos e 6 inativos |
| Carnaúba dos Dantas | 92 | berílio, nióbio, tântalo | quartzo, feldspato | pegmatito | 32 ativos e 60 inativos |
| Currais Novos | 42 | berílio, nióbio, tântalo | quartzo, feldspato | pegmatito | 14 ativos e 28 inativos |
| Equador | 84 | berílio, nióbio, tântalo | quartzo, feldspato, gemas | pegmatito | 35 ativos e 49 inativos |
| Jardim do Seridó | 11 | berílio, nióbio, tântalo | quartzo, feldspato | pegmatito | 6 ativos e 5 inativos |

| Município | Ocorrências | Minerais metálicos | Minerais não metálicos | Rocha | Situação |
|--------------|-------------|--------------------------|------------------------------|-----------|--------------------------|
| Parelhas | 252 | berílio, nióbio, tântalo | quartzo, feldspato, ametista | pegmatito | 86 ativos e 166 inativos |
| Laje Pintada | 5 | berílio | quartzo, feldspato, gemas | pegmatito | 4 ativos e 2 inativos |

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Além dos rejeitos provenientes da lavra de pegmatitos, foram analisadas também as pilhas de estéril geradas em lavras de granito exploradas na PPB, conforme demonstradas na Tabela 2. Os dados revelam a existência de volumes expressivos de material estéril acumulado, oriundo de diferentes minas localizadas nos municípios de Parelhas/RN, Santana do Seridó/RN, São Vicente do Seridó/PB, Nova Palmeira/PB e Picuí/PB.

As pilhas apresentam áreas variando entre 512 m² e 7.849 m², com volumes estimados de até 15.698 m³, como é o caso da Mina Morada Nova, em Picuí/PB. Outras minas, como Santo Antônio 3 (Parelhas/RN) e Tuiuiú (Santana do Seridó/RN), também se destacam com volumes superiores a 10 mil m³, o que evidencia um elevado potencial de reaproveitamento.

Esses estérreis, embora considerados inicialmente como resíduos, representam uma possível fonte de material para rochagem, especialmente por se tratar de granito, rocha reconhecidamente rica em minerais que podem atuar como remineralizadores do solo. Diante disso, o reaproveitamento dessas pilhas pode constituir uma solução sustentável para o setor mineral, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o aumento da fertilidade dos solos agrícolas da região.

A Tabela 2 apresenta a relação das pilhas de estéril localizadas em diferentes minas dos municípios de Parelhas, Santana do Seridó, Equador (RN) e Nova Palmeira, Picuí e São Vicente do Seridó (PB). Os dados evidenciam que há volumes expressivos de material estéril acumulado, tanto em lavras de granito quanto de

pegmatito, o que reforça a importância de iniciativas voltadas ao seu reaproveitamento.

Tabela 2 - Pilhas de estéril das lavras de granito, com respectivas **áreas** e volumes estimados

| RELAÇÃO DAS PILHAS DE ESTÉRIL | | | Pilha de Estéril Volume | |
|-------------------------------|------------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| Cidade/Estado | Substância | Nome da Mina | Área (m ²) | Volume (m ³) |
| Parelhas/RN | Granito | Saco largo | 4.800 | 9.600 |
| Parelhas/RN | Granito | Santo antonio 2 | 500 | 1.000 |
| Parelhas/RN | Granito | Santo antonio 3 | 6.200 | 12.500 |
| Parelhas/RN | Pegmatito | Bolandeira | 5.000 | 11.000 |
| Santana do Seridó/RN | Granito | Tuiuiú | 3.500 | 10.600 |
| S. V. do Sérido/PB | Granito | Mina Serra Verde | 4.400 | 9.000 |
| Equador/RN | Pegmatito | Saco de cima | 1.000 | 2.200 |
| S. V. do sérido/PB | Granito | Remédio de cima | 2.300 | 4.700 |
| Nova Palmeira/PB | Granito | Mina jabitacá | 1.700 | 3.500 |
| Picuí/PB | Granito | Mina morada nova | 7.800 | 15.600 |

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

As áreas das pilhas variam de 500 m² (como na mina Santo Antônio 2, em Parelhas/RN) até 7.800 m², caso da mina Morada Nova, em Picuí/PB. Os volumes de material descartado vão de 1.000 m³ a impressionantes 15.600 m³, refletindo diretamente o porte e o tempo de operação de cada lavra.

Entre os destaques, encontram-se:

- A Mina Morada Nova (Picuí/PB), com o maior volume registrado (15.600 m³);
- As minas Bolandeira e Santo Antônio 3 (Parelhas/RN), com volumes superiores a 10 mil m³;
- E a Mina Tuiuiú (Santana do Seridó/RN), que também ultrapassa 10.000 m³ de estéril acumulado.

Esses dados evidenciam o potencial de reaproveitamento desses materiais, sobretudo no contexto da rochagem, considerando que tanto o granito quanto o pegmatito contêm minerais que podem atuar como fontes de macronutrientes e micronutrientes para os solos. A correta caracterização mineralógica e química dessas pilhas pode viabilizar sua inserção em cadeias produtivas sustentáveis, reduzindo impactos ambientais e promovendo a economia circular na mineração.

Esse rejeito é constituído, predominantemente, por fragmentos de quartzo, feldspato e micas, além de possíveis minerais acessórios não aproveitados no processo de extração manual, como turmalinas, berilos, fosfatos e outros minerais raros. Tal composição sugere um potencial significativo para o reaproveitamento industrial, sobretudo como insumo na remineralização de solos agrícolas.

A localização da pilha (Figura 2), disposta de forma desordenada nas proximidades do corpo pegmatítico, evidencia a ausência de planejamento técnico na disposição do material, o que pode acarretar impactos ambientais, como obstrução da drenagem superficial e riscos de instabilidade durante os períodos chuvosos. Contudo, sob a ótica da rochagem, essa pilha representa uma alternativa viável e sustentável para valorização de resíduos da mineração, alinhando-se às práticas de economia circular e gestão responsável dos recursos minerais. A caracterização físico-química detalhada desse material poderá contribuir para confirmar sua viabilidade como remineralizador.

Figura 2 – Imagem aérea da pilha de rejeito de pegmatito em uma mina localizada em Picuí – PB.



Fonte: Autores (2025).

REFERÊNCIAS

BELOTTI, F. M.; SCHOLZ, R.; FRIGUETTO, B. S. Potencial de reaproveitamento de rejeitos de extração de pegmatitos no processo de rochagem. **11º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**. Porto Alegre, 8p., 2018.

ČERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. **Geoscience Canada**, v.18, p.49-67, 1991.

JOHNSTON JR., W. D. Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil. **DNPM/DFPM (Boletim n.72)**. Rio de Janeiro, 85p., 1945.

MOORE, J. E. Lavra de pegmatitos tantalíferos e gluciníferos no Nordeste do Brasil. **DNPM/DFPM (Boletim n.71)**. Rio de Janeiro, 58p., 1945.

RAMOS, A. J.S. Mineração e exploração do trabalho na Província Pegmatítica Borborema-Seridó. Tese de Doutorado, UFRJ

(Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional). Rio de Janeiro, 299p., 2017.

ROLFF, P. A. M. A. Reservas minerais do município de Picuí. **DNPM/DFPM (Boletim n. 80)**. Rio de Janeiro, 54p., 1946.

ROLFF, P. A. M. A. Os pegmatitos da Borborema (notas sobre a sua pesquisa e lavra). **Revista Escola de Minas**, n.4, p.55-63, 1951.

SCORZA, E. P. Província Pegmatítica da Borborema (Nordeste do Brasil). **DNPM/DGM (Boletim n. 112)**. Rio de Janeiro, 76p., 1944.

SOARES, D. R. Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaitas gemológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. Tese de Doutorado, UFPE (Pós-Graduação em Geociências). Recife, 287p., 2004.

SOARES, D. R.; BEURLEN, H.; DA SILVA, M. R. R.; GONZAGA, F. A. S.; SANTOS

FILHO, J. I.; OLIVEIRA, H. B. L. Variedades gemológicas de minerais da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil: uma síntese. **Estudos Geológicos**, UFPE, v.28, n.1, p.56-71, 2018.

SOARES, D. R.; GONZAGA, F. A. S.; FERREIRA, A. C. M.; CAITANO, H. K. C.; FARIA,

B.; SOUSA, D. B. Aspectos técnicos da lavra do pegmatito Alto Feio, Pedra Lavrada, Paraíba. **Holos**, IFRN, ano 32, v.1, p.403-412, 2016.

THEODORO, S. H. Cartilha de rochagem. **Gráfica e Editora Ideal**. Brasília, 32p., 2020.

CAPÍTULO 7

AGRICULTURA FAMILIAR E ROCHAGEM COMO INSTRUMENTOS DE SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Daiana Caroline Refati¹

Rodrigo Santana Macedo²

Maria Robeilsa dos Santos Silva³

Emanuel da Costa Cavalcante⁴

Marianna Sodré Ferreira de Sousa⁵

Jacqueline da Rocha Cavalcanti⁶

Joice Kelly Santos da Silva⁷

Antonio Augusto Pereira de Sousa⁸

1 Mestra em Desenvolvimento Rural Sustentável e Geógrafa pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), daianacarinerefati@gmail.com;

2 Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela ESALQ/USP - SP, Professor da Unidade Acadêmica de Ciências Agrárias, UFG - PB. rodrigo.santana@professor.ufcg.edu.br;

3 Graduanda em Agroecologia. Universidade Estadual da Paraíba, UEPB. maria.robeilsa@aluno.uepb.edu.br;

4 Mestre em Ciência do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA Campus II, UFPB. emanuel.c@aluno.uepb.edu.br

5 Graduanda em Bacharelado em Química na Universidade Federal da Paraíba – CCEN/ UFPB. sodré marianna@gmail.com;

6 Graduanda em Licenciatura em Química na Universidade Estadual da Paraíba – DQ/ CCT/UEPB. jacqueline.cavalcanti@aluno.uepb.edu.br

7 Graduanda em Licenciatura em Química na Universidade Estadual da Paraíba – DQ/ CCT/UEPB. joice.santos@aluno.uepb.edu.br.

8 Doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Professor do Departamento de Química-DQ/CCT/UEPB. antonioaugusto@servidor.uepb.edu.br;

AGRICULTURA FAMILIAR

CONCEITOS

A agricultura familiar vem se consolidando ao longo das últimas décadas como um dos principais segmentos agrícolas do Brasil, que garante segurança alimentar de milhões de famílias, mesmo não possuindo grande capital investido nem tecnologias avançadas de cultivo. Esse sistema também se relaciona com a conservação de valores tradicionais e com o meio ambiente a partir de práticas aliadas ao desenvolvimento rural sustentável (Schneider, 2006).

Várias denominações existem ou já existiram para distinguir essa categoria social no meio rural, a saber: pequena produção, produção familiar rural, pequenos agricultores, produção familiar coletiva, agricultura de subsistência ou autoconsumo, colonos, sertanejos, campeses ou campesinato em um nível político e conceitual, entre outras denominações (Schmitz e Mota, 2007; Mattei, 2014; Schneider e Cassol, 2014). No entanto, durante o processo de modernização da agricultura no Brasil, entre as décadas de 1950 a 1970, as políticas públicas na área rural, em especial a política agrícola, não contemplaram essas categorias sociais, privilegiando apenas os setores

mais capitalizados e a esfera produtiva das commodities voltadas ao mercado internacional e produzidas nos grandes latifúndios ou, atualmente chamado, agronegócio (Mattei, 2014).

Somente com o processo de redemocratização, juntamente com a Constituição Federal de 1988, que ocorreu uma nova história para a então chamada agricultura familiar, onde novos espaços de participação social e direitos foram reconhecidos, como: a criação do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf), em 1995, (que representou a legitimação dessa nova categoria social, os agricultores familiares); a criação do Ministério do

Desenvolvimento Agrário (MDA), em 1999, e, em 2006, a regulamentação da Lei da Agricultura Familiar que reconheceu essa categoria social, definiu sua estrutura conceitual e passou a balizar as políticas públicas para este grupo social (Grisa e Schneider, 2015).

Segundo a Lei Nº 11.326 de 24 de julho de 2006, considera-se agricultor familiar e empreendedor rural aquele que pratica atividades no meio rural, atendendo simultaneamente os seguintes requisitos: I) não detenha área maior que 4 módulos fiscais; II) utilize predominantemente mão de obra da própria família nas atividades econômicas do seu estabelecimento; III) tenha renda familiar originada de atividades econômicas vinculadas ao próprio estabelecimento; IV) dirija seu estabelecimento ou empreendimento com sua família.

TIPIFICAÇÕES

Do ponto de vista teórico, há divergências conceituais quanto ao uso do conceito de agricultura familiar, que recebia outras denominações segundo o contexto regional ou histórico-social, dentre elas, a de campesinato, antes da implantação do Pronaf (Schneider, 2009b). Nesta perspectiva, o debate gira em torno da constituição desse ator social: trata-se da reprodução pura e simples de um campesinato “tradicional” com sua forma específica de funcionamento e de reprodução ou da emergência de um novo “personagem” na atividade agrícola e no meio rural, capaz de responder às exigências da sociedade e do mercado moderno? (Wanderley, 2003).

Segundo alguns estudiosos, a agricultura familiar não deve ser classificada como camponesa em vista dos diferentes vínculos e relações engendradas no processo de produção em que está inserida, equilibrando relações de produção e consumo, onde o objetivo é o valor de uso e não o valor de troca (Chayanov, 1981; Fabrini,

2007). Ademais, a figura do agricultor familiar como sujeito moderno ganhou força em oposição ao campesinato visto como antigo, contribuindo para destruir a ideologia do campesinato como sujeito histórico na luta contra o capital (Fernandes, 2009).

Já para Wanderley (2003), o agricultor familiar mesmo tendo que se adaptar às exigências da agricultura moderna, ainda guarda muitos dos seus traços camponeses (elementos de continuidade), à medida em que a família continua sendo o objeto principal que define as estratégias de produção, reprodução e a instância imediata de decisão.

Ainda sobre a diversidade interna da agricultura familiar, Salvoldi e Cunha (2010) consideram três tipificações: a família agrícola de caráter empresarial, que possui estrutura econômica, social e técnica para investir em uma produção rentável voltada para o mercado; a família camponesa, que tem como principal objetivo a manutenção da produção agrícola, sem orientar sua prática pelos padrões produtivistas de mercado; e a família agrícola urbana, que orienta a produção com foco na qualidade de vida, sem desmerecer, de um lado, a realidade de mercado, e de outro, os valores da família camponesa.

Independentemente da diversidade de termos ou tipificações, para fins de mapeamento e coleta de dados referentes a essas famílias, os órgãos públicos, como o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), recorrem a já referida Lei 11.326 de 2006 como base legal, sistematizando informações de estabelecimentos que possuem mão de obra exclusivamente familiar.

ESTRUTURA

No Brasil, foram contabilizados cerca de 3.897.408 ou 77% de estabelecimentos classificados como de agricultura familiar, responsáveis por 23% do valor da produção agrícola nacional, ocupando

uma área de 80,9 milhões de hectares, o que representa 23% da área total dos estabelecimentos agropecuários. Trabalham na agricultura familiar cerca de 10,1 milhões de pessoas representando 67% da mão de obra dos estabelecimentos agropecuários (IBGE, 2019).

No Semiárido Brasileiro (SAB), também há um grande número de estabelecimentos caracterizados como de agricultura familiar, cerca de 1,44 milhões, e, devido às secas extremas e ao fenômeno da desertificação, a região demanda maior empenho para a promoção da sustentabilidade rural deste segmento, que envolve mais de 3,65 milhões de pessoas. A área média dos estabelecimentos é de apenas 15 ha, enquanto os não familiares ocupam 80 ha de terra, o que revela um quadro de concentração fundiária no território brasileiro (Silva, *et al.*, 2020).

O tamanho limitado das áreas de produção na grande maioria dos estabelecimentos de agricultura familiar no SAB (63,4% com até 10 ha) dificulta o acesso a fontes de recursos hídricos para produção, limita as capacidades produtivas daquele segmento e termina por impactar os recursos naturais do Semiárido (Silva *et al.*, 2020).

Apesar da má distribuição de terras, a agricultura familiar do Semiárido produz uma diversidade de produtos fundamentais para a dieta sertaneja, destacando-se na produção de feijão fradinho (68,7%), arroz em casca (65,2%), mandioca (80,9%), batata-doce (69,2%), jerimum (53,7%), além de produtos da horticultura e do extrativismo, a exemplo do umbu (81,8%) (Silva *et al.*, 2020).

Apesar desta grande diversidade de alimentos, a agricultura familiar no Semiárido ainda apresenta desafios sociais relacionados com concentração de terra e água, exclusão e invisibilidade social, e desafios ambientais como as mudanças climáticas, secas e desertificação, assim, a questão ambiental também deve ser analisada na agricultura familiar, pois o intenso processo de modernização da agricultura acarretou em impactos ambientais e transformações

sociais que justificam a revisão de todo o modelo de desenvolvimento imposto pela Revolução Verde (Caporal e Costabeber, 2004).

Em adição, pesquisas também debatem sobre o futuro da sustentabilidade na agricultura familiar em decorrência da atual trajetória de expansão do capitalismo, tentando compreender quais estratégias de produção que o agricultor tem ou poderá vir a ter, para construir no meio rural, uma consciência econômica, social e ecológica baseada em relações sustentáveis entre homem e natureza frente a avassaladora racionalidade econômica que orienta a economia de mercado (Rocha e Brandenburg, 2003). Nesse contexto, há a necessidade de se estabelecer estratégias de convivência sustentável que garantam a permanência dos agricultores na terra, aliadas a práticas de convivência com as secas incluindo o reaproveitamento de materiais de ocorrência natural, como rochas e minerais amplamente disponíveis nas imediações dos agroecossistemas familiares, que possuem potencial para aumentar a produtividade desses sistemas de forma sustentável a partir da liberação de nutrientes essenciais à nutrição de plantas.

ROCHAGEM

CONCEITO

A utilização de pó de rochas moídas na agricultura, prática denominada como rochagem, vem ao longo das últimas décadas tornando-se uma alternativa para substituir e diminuir o impacto ao ambiente causado pelo elevado emprego de fertilizantes químicos, bem como, busca aumentar a fertilidade dos solos a partir da utilização de fontes alternativas mais baratas e de baixo custo (Swoboda *et al.*, 2022). Isso é possível por que alguns tipos de rochas e minerais podem disponibilizar macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas por um período superior a cinco anos após sua incorporação nos solos (Theodoro *et al.*, 2013). Como as plantas

absorvem nutrientes somente em quantidades requeridas para seu desenvolvimento, os demais nutrientes disponibilizados via intemperismo mineral podem ser retidos no solo, com implicações favoráveis do ponto de vista agronômico (liberação lenta de nutrientes, redução de custos com insumos), ambiental (retenção de elementos tóxicos) e social (produção de alimentos, segurança alimentar) (Basak *et al.*, 2018; Manning e Theodoro, 2020).

ROCHAGEM E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Historicamente as investigações relacionadas com o potencial de minerais e rochas como fonte alternativa de nutrientes têm sido majoritariamente conduzidas no âmbito da fertilidade dos solos, restringindo-se à avaliação nos atributos dos solos e no crescimento de plantas (Manning, 2018; Ramos *et al.*, 2021). Entretanto, estudos recentes têm demonstrado o papel das rochas/minerais em prover diferentes serviços ambientais, favorecendo a manutenção, recuperação ou melhoria de importantes serviços ecossistêmicos (Swoboda *et al.*, 2022), que, por sua vez, estão alinhados aos objetivos do desenvolvimento sustentável (ONU, 2024). Dentre esses serviços, a rochagem pode contribuir para inúmeras melhorias no âmbito dos sistemas agrícolas com base familiar, tais como: (i) contribuir para o sequestro de carbono atmosférico, ou seja, para a manutenção da matéria orgânica nos solos, melhorando sua capacidade de retenção de água e adsorção de nutrientes; (ii) aumentar a produção agrícola a partir da liberação de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, tais como P, K, Ca, Mg e S, com implicações diretas ao aumento da segurança alimentar; (iii) incrementar a qualidade física e química dos solos e, consequentemente, contribuindo para o aumento da resiliência dos agricultores familiares, notadamente daqueles mais pobres que dependem da agricultura de subsistência (Dietzen *et al.*, 2018; Amann *et al.*, 2020; Swoboda *et al.*, 2022).

PERSPECTIVAS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

A rochagem pode contribuir sobremaneira para o rejuvenescimento dos solos a partir do processo de remineralização. Em algumas regiões do SAB, onde os níveis pluviométricos permitem a formação de solos profundos e altamente intemperizados, caracterizados pela baixa reserva mineral e acentuada distrofia, a liberação de macronutrientes via intemperismo pode sobremaneira contribuir para a reincorporação dessas áreas às atividades agrícolas e/ou contribuir para uma menor dependência da utilização dos adubos convencionais de alta solubilidade.

Em agroecossistemas familiares localizados em áreas com baixos índices pluviométricos, marcadas pela distribuição irregular de chuvas, a rochagem deve contribuir para a recuperação de áreas degradadas por meio do aumento do tempo de residência da matéria orgânica nos solos. Esse processo também deve ser acompanhado de melhorias na qualidade física (por exemplo, aumento da agregação e aeração), fato esse crucial para o estabelecimento de técnicas de manejo e conservação dos solos visando aumentar a retenção de água em áreas submetidas a severo déficit hídrico e períodos de secas prolongados. Em menor escala, melhorias na qualidade química de solos arenosos ou horizontes superficiais distróficos também podem ser cruciais para a continuada produção de sistemas agrícolas de subsistência. Tal fato certamente deve reduzir os custos ambientais e econômicos com recuperação de áreas degradadas no SAB.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manutenção das funções ecológicas de agroecossistemas de base familiar é sem dúvida uma alternativa para alcançar a segurança e a soberania alimentar no combate à fome e a pobreza mundial (FAO). Entretanto, projeções para o SAB como: incremento da

aridez, redução das chuvas e períodos de seca mais longos (Tomasella *et al.*, 2018; Barbosa, 2024) ameaçam a soberania alimentar e hídrica dessa região. Isso torna imperativo a adoção de ações que aumentem a resiliência desses agroecossistemas, cuja rochagem surge como uma alternativa sustentável para melhoria/manutenção da qualidade de solos altamente intemperizáveis ou degradados/desertificados. Importante nesse processo é associar a rochagem com a provisão de importantes serviços ecossistêmicos, constituindo uma efetiva estratégia para aumentar a resiliência dos agricultores familiares do Semiárido Brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio institucional da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), que fomentou bolsas de estudos, materiais e ambiente para projetos de pesquisa e extensão. Ao programa de Gestão Ambiental nas Empresas (PGAMEN) pelo incentivo ao nosso projeto, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro à Chamada CNPq/CTMineral/CT-Energ nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais Estratégicos e pela concessão de bolsas de estudos dos autores.

REFERÊNCIAS

- AMANN, T., HARTMANN, J., STRUYF, E., DE OLIVEIRA GARCIA, W., FISCHER, E.K., JANSSENS, I. A., MEIRE, P., SCHOELYNCK, J. Enhanced weathering and related element fluxes - a cropland mesocosm approach. **Biogeosciences**, n. 17, p. 103-119, 2020.
- BARBOSA, H. A. Understanding the rapid increase in drought stress and its connections with climate desertification since the early 1990s over the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, n. 222, p. 105142, 2024.

BASAK, B. B., SARKAR, B., SANDERSON, P., NAIDU, R. Waste mineral powder supplies plant available potassium: evaluation of chemical and biological interventions. *J. Geochem. Explor.*, n. 186, p. 114-120, 2018.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. *Agroecologia e Extensão Rural: contribuições para a promoção do desenvolvimento rural sustentável*. Porto Alegre, 2004.

CHAYANOV, A. Sobre a teoria dos sistemas econômicos não capitalistas. In: GRAZIANO Da Silva, J. e STOLKE, V. *A questão agrária*. São Paulo, Brasiliense. 1981.

DIETZEN, C., HARRISON, R., MICHELSSEN-CORREA, S. Effectiveness of enhanced mineral weathering as a carbon sequestration tool and alternative to agricultural lime: an incubation experiment. *Int. J. Greenh. Gas Cont.*, n. 74, p. 251-258, 2018.

FABRINI, J. E. A resistência camponesa para além dos movimentos sociais. *Revista NERA*. Presidente Prudente, n.11, p. 8-32, 2007. DOI: <https://doi.org/10.47946/rnera.v0i11.1406>

FERNANDES, B. M.; MEDEIROS, L. S. DE; PAULILO, M. I. Lutas camponesas contemporâneas: condições, dilemas e conquistas: O campesinato como sujeito político nas décadas de 1950 a 1980. São Paulo: Editora Unesp. 2009.

GRISA, C.; SCHNEIDER, S. Três gerações de políticas públicas para a agricultura familiar e formas de interação entre sociedade e Estado no Brasil. In: GRISA, C.; SCHNEIDER, S. (Org.) **Políticas Públicas de Desenvolvimento Rural no Brasil**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agro 2017: população ocupada nos estabelecimentos agropecuários cai 8,8%. 2019. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02, mar, 2022.

IBGE Cidades. Produção Agrícola: Lavouras Permanentes e Temporárias, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 24, mar, 2022.

- MANNING, D. A. C. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. **Nat. Resour. Res**, v. 27, n. 2, p. 217-227, 2018.
- MANNING, D. A., THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **Ext. Ind. Soc**, v. 7, n. 2, p. 480-487, 2020.
- MATTEI, L. O papel e a importância da agricultura familiar no desenvolvimento rural brasileiro contemporâneo. **Revista Economia**. Fortaleza, v. 45, p. 71-79, 2014.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. MEIO AMBIENTE. Disponível em: https://nacoesunidas.org/?post_type=post&s=MEIO+AMBIENTE/. Acesso em: abr., 2024.
- RAMOS, C. G.; HOWER, J. C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S.; THEODORO, S. H. Possibilities of using silicate rock powder: an overview. **Geosci. Front**, v. 4, n. 2, p. 101185, 2021.
- ROCHA, J. M. DA; BRANDENBURG, A. Limites e desafios da agricultura familiar: A sustentabilidade em questão. **Revista Redes**, n. 8, v. 2, p. 93-104, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17058/redes.v8i2.10947>
- SAVOLDI, A.; CUNHA, L. A. Uma abordagem sobre a agricultura familiar, Pronaf e a modernização da agricultura no sudoeste do Paraná na década de 1970. **Revista Geografar**, Curitiba: Universidade Federal do Paraná - UFPR, Programa de Pós- Graduação em Geografia, v. 5, n. 1, p. 25-45, 2010.
- SCHMITZ, H.; MOTA, D. M. Agricultura Familiar: elementos teóricos e empíricos. **Revista Agrotrópica**. Bahia, v. 19, p. 21-30, 2007.
- SCHNEIDER, SERGIO; CASSOL, ABEL. Diversidade e Heterogeneidade da Agricultura Familiar no Brasil e algumas implicações para políticas públicas. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.31, n.2, p. 227-263, 2014.
- SCHNEIDER, S. Mercados e agricultura familiar. In. MARQUES, F. C.; CONTERATO, M. A.; SCHNEIDER, S. (Orgs.). 2016. **Construção de mercados e agricultura familiar: desafios para o desenvolvimento rural**. Editora UFRGS.

- SCHNEIDER, S. A diversidade da agricultura familiar. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 2009.
- SCHNEIDER, S. Agricultura familiar e desenvolvimento rural endógeno: elementos teóricos e um estudo de caso. In: FROEHLICH, J. M.; VIVIEN, D. (Org.). **Desenvolvimento rural – tendências e debates contemporâneos**. Ijuí: Unijuí, 2006.
- SILVA, R. M. A. *et al.* Características produtivas e socioambientais da agricultura familiar no Semiárido brasileiro: evidências a partir do Censo Agropecuário de 2017. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**. Curitiba, v. 55, p. 314-338, 2020. DOI: 10.5380/dma.v55i0.73745.
- SWOBODA, R.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders. **A review. Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150976, 2022.
- THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; ROCHA, E. L.; MACEDO, I.; REGO, K. Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the Tucuruí degraded land for agroforest reclamation. **Acad. Brasil. Cienc**, v. 85, n. 1, p. 23-34, 2013.
- TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; DE OLIVEIRA SANTANA, M.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 73, 197-206, 2018.
- WANDERLEY, M. N. B. Agricultura familiar e campesinato: rupturas e continuidades. **Revista Estudos Sociedade e Agricultura**. Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, p. 42-61, 2003.

CAPÍTULO 8

A FITOTECNIA NA AGRICULTURA FAMILIAR NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Marília de Macêdo Duarte Moraes¹

Antonio Augusto Pereira de Sousa²

Rodrigo Santana Macedo³

Cristiano dos Santos Sousa⁴

Emanuel da Costa Cavalcante⁵

Carlos Antônio Andrade da Silva⁶

Vicente Victor Lima de Andrade⁷

José Félix de Brito Neto⁸

-
- 1 Doutora em Agronomia pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Bolsista DTI-A pelo CNPq. mariliaduartebio@gmail.com;
 - 2 Doutor Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Professor Departamento de Química. Professor do Departamento de Química - DQ/CCT/UEPB. antonioaugusto@servidor.uepb.edu.br;
 - 3 Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela ESALQ/USP - SP, Professor da Unidade Acadêmica de Ciências Agrárias, UCFG – PB. rodrigo.santana@professor.ufcg.edu.br;
 - 4 Mestre em Ciências do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA CAMPUS II, UFPB.cristianosousa@servidor.uepb.edu.br;
 - 5 Mestre em Ciências do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA CAMPUS II, UFPB. emanuel.@@aluno.uepb.edu.br;
 - 6 Graduando em Agronomia na Universidade Estadual da Paraíba – UEPB – Campus II. antonio.carlos.andrade@aluno.uepb.edu.br
 - 7 Graduando em Agronomia na Universidade Estadual da Paraíba – UEPB – Campus II. vicente.aluno@gmail.com
 - 8 Doutor em Agricultura pela Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho-Botucatu – UNESP. Professor no Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB/ Campus II. felix.brito@servidor.uepb.edu.br

INTRODUÇÃO

A erradicação da fome, da insegurança alimentar e de todas as formas de desnutrição são desafios da humanidade. Atualmente, a população está vivenciando complexidades relacionadas aos sistemas de produção e consumo, cada um com suas próprias dimensões ecológicas, econômicas e sociais sem uma causa única ou uma solução simples (Matzembacher e Meira, 2019). Há, portanto, uma preocupação crescente sobre o futuro da agricultura na interface rural-urbana (Sharp *et al.*, 2002).

A agricultura familiar desempenha papel importante no abastecimento alimentar mundial (Cavalli *et al.*, 2020). Reconhecida pela Organização das Nações Unidas (ONU), desempenha importante papel para a segurança alimentar global, especialmente no enfrentamento às desigualdades sociais, pobreza e conservação da biodiversidade (Silva e Nunes, 2022). No entanto, a agricultura familiar apesar de buscar aumentar a produção para atender à demanda mundial e garantir a segurança alimentar, necessita da adoção de práticas agrícolas sustentáveis, que preservem o meio ambiente e a saúde humana (Laurett *et al.*, 2022; Muhie, 2022), principalmente no que se refere às diversas mudanças climáticas que vêm causando uma série de problemas para as atividades agrícolas em todo o Brasil e, no Semiárido Brasileiro.

No território brasileiro, 974.752 km² são terras áridas (Corrêa *et al.*, 2019) e 844.000 km² correspondem à região semiárida (Brasil, 2020). Desta última, aproximadamente 330.000 km² são dedicados à produção agrícola (De Medeiros, Gonzaga, *et al.*, 2023), consistindo principalmente de pequenos agricultores familiares (Sousa *et al.*, 2021).

O aumento das temperaturas, a diminuição dos índices pluviométricos e o aumento da irregularidade das chuvas têm tornado cada vez mais difícil a produção nessa região do país. O Semiárido Brasileiro apresenta curtos períodos sazonais de precipitação,

evapotranspiração e temperaturas elevadas, o que limita a produção de biomassa vegetal (Antonino *et al.*, 2000).

A pluviosidade média anual do Semiárido não ultrapassa os 800 mm, enquanto a evaporação atinge patamares de mais de 2.000 mm no mesmo período, o que constitui um balanço hídrico negativo. A situação agrava-se quando incide sobre a área uma insolação anual média em torno de 2.800 hectares (ha). As temperaturas médias máximas climatológicas podem chegar a valores em torno dos 34°C (UEMA, 2025). Essas condições fazem do Semiárido Brasileiro um espaço geográfico de extremos, onde a convivência com a escassez hídrica é mais do que uma necessidade, é a chance da sobrevivência (Silva e Regitano Neto, 2019).

Como consequência, essas regiões sofrem com o déficit hídrico para agricultura e até mesmo para consumo humano (De Figueiredo *et al.*, 2024). Em resposta à distribuição insuficiente e irregular das chuvas, há comprometimento de crescimento, desenvolvimento e produtividade agrícola. Todos esses aspectos tornam o Semiárido Brasileiro um ecossistema frágil (Althoff *et al.*, 2016).

Mas, mesmo sendo considerada frágil, a região possui uma grande variedade de sistemas agrícolas, resultantes de diferentes solos, topografias e padrões hídricos se destacando pelo plantio de soja, algodão, mandioca, cana-de-açúcar, milho e feijão, sendo os dois últimos considerados culturas de subsistência (Antonino *et al.*, 2000; INSA, 2025). Desta forma, o objetivo foi apresentar informações sobre a agricultura familiar dependente de chuva na região semiárida brasileira e, também, suas potencialidades e alternativas para reduzir as fragilidades nos diferentes sistemas produtivos.

METODOLOGIA

O presente estudo é um construto teórico a partir de levantamento bibliográfico, conforme preconizado por Gil (2009). A

pesquisa caracteriza-se quanto a seu objetivo, como descritiva, enquanto ao seu procedimento técnico, como bibliográfica, foram utilizados os seguintes critérios para obtenção das informações: foram incluídos artigos científicos escritos na língua portuguesa ou inglesa, disponíveis *online* que retratem o tema em âmbito nacional e internacional, identificados em plataformas como a Periódicos da Capes e Google Acadêmico. Foram excluídos trabalhos de teses e dissertações encontrados em repositórios universitários, bem como artigos científicos que não tratavam do Semiárido Brasileiro e que não abordassem a agricultura familiar, além de trabalhos com menos de cinco páginas.

A escolha do material bibliográfico obedeceu ao critério de relevância, temática, temporalidade e atualidade dos mesmos, sendo acatadas publicações realizadas nos últimos dez anos, no que tange a aspectos mais generalísticos e conceituais e de cinco anos, de forma a traçar um perfil mais atual para a abordagem da temática. Entretanto, vale destacar que estudos relevantes na área de conhecimento, seja por seu lastro ou relevância histórico-legal, foram utilizados não respeitando a delimitação de temporalidade.

Para prover um melhor delineamento do escopo de estudo, foram utilizadas palavras-chave dentro da temática da pesquisa, usando como filtro “fitotecnia no semiárido brasileiro” ou “agricultura familiar no semiárido brasileiro” ou “fitotecnia na agricultura familiar”, nos processos de busca de forma isolada ou consorciada, propiciando assim a exclusão de referências que não possuíam relação com a temática.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das pesquisas nas bases de dados citadas anteriormente, foram encontrados 17.000 e, após a aplicação do critério tempo, 11.500 resultados. Após a aplicação dos critérios de exclusão,

foram selecionados 1.370 trabalhos. Estes foram mais uma vez criteriosamente analisados e, destes, 43 foram relevantes para a construção deste levantamento bibliográfico.

A agricultura familiar, presente em mais de dois milhões de estabelecimentos brasileiros, ocupa área de aproximadamente 28 milhões de hectares empregando 8,6 milhões de pessoas, das quais 38% residem no Semiárido (Melo e Voltolini, 2019). Aproximadamente, metade da população que reside no Semiárido Brasileiro depende da agricultura, principalmente como agricultura de subsistência (Sousa *et al.*, 2022). Na região, é comum a presença de solos arenosos que são caracterizados por baixo teor de matéria orgânica, teor de areia superior a 85%, alta condutividade hidráulica, baixa capacidade de troca catiônica e retenção de nutrientes (Fujii *et al.*, 2017; Huang & Hartemink, 2020), características estas que aumentam a vulnerabilidade do solo e da agricultura, especialmente devido aos impactos previstos pelas mudanças climáticas, como o aumento da aridez (Hofbauer *et al.*, 2022).

Além da aridez, a limitação hídrica e as altas temperaturas comprometem a decomposição da matéria orgânica no solo (MOS), limitando a produção de biomassa vegetal (De Souza Medeiros *et al.*, 2020), tornando-a mais lenta e menos eficiente (Sousa *et al.*, 2022). Essa fragilidade natural impõe às famílias o desafio de buscar métodos que as permitam produzir de maneira sustentável. Nesse contexto, diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de desenvolver soluções que aprimorem a qualidade do solo e promovam o cultivo sustentável, mesmo diante das limitações. É importante destacar que, independentemente da cultura, as práticas agrícolas que proporcionam o desenvolvimento bem-sucedido das plantas são aquelas que visam, principalmente, à manutenção ou elevação da umidade do solo. Para isso, métodos como adubação (Melo *et al.*, 2009), a fertilização (Da Costa *et al.*, 2024), a conservação de invertebrados do solo (Nunes *et al.*, 2012), manutenção

da cobertura morta (Nunes *et al.*, 2009) ou os cultivos simultâneos contribuem para a melhora da qualidade do solo. A manutenção da cobertura morta em todas as culturas, por exemplo, é algo que mantém patamares de produtividade de forma significativa (Silva e Regitano Neto, 2019).

A cobertura morta, além de minimizar o efeito do desgaste pelo impacto direto das gotas de chuva no solo, tem capacidade de reduzir a temperatura do ambiente radicular, auxilia na decomposição de resíduos e, por consequência, aumenta o teor de matéria orgânica e a capacidade de ciclagem possibilitando maior disponibilidade de nutrientes para as culturas (Souza *et al.*, 2020). Estudos conduzidos por Dantas *et al.* (2023) analisaram como o uso de cobertura morta (casca de arroz) poderia influenciar sobre as características morfofisiológicas e de produtividade da palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e como resultados obtiveram maior número de cladódios por planta, sendo estes mais espessos e com maior área

superior além de menor teor de matéria seca, sendo assim confirmado o uso favorável de cobertura morta nas cactáceas. Souza *et al.* (2020) constataram que o uso de cobertura morta foliar (plantas daninhas espontâneas) aumentou a taxa fotossintética e o crescimento da *N. cochenillifera* e atribuíram à cobertura morta a redução dos efeitos negativos da radiação solar direta e da velocidade do vento na superfície do solo, principalmente em solos semiáridos, nos quais a evaporação é comumente elevada, acima de 10 milímetros diários (mm dia⁻¹).

No entanto, práticas agrícolas convencionais (em que os agricultores adotam a queima da vegetação nativa e o preparo do solo com arados) e em sequeiro, que são frequentemente adotadas pelas famílias da região, contrastam com esses benefícios ao promover a desestruturação do solo. O manejo convencional promove a desestruturação do solo por meio da fragmentação dos macroagregados,

resultando na formação de microagregados. Esse processo expõe a fração lábil da matéria orgânica, impactando negativamente os teores de carbono orgânico no solo (COS) e comprometendo sua qualidade estrutural e funcional (De Souza Medeiros *et al.*, 2020). Aumentar os estoques de COS adotando melhores práticas de manejo é uma necessidade urgente para redução dos gases de efeito estufa do carbono fóssil (De Alencar *et al.*, 2024). Além disso, solos arenosos possuem maior facilidade de mineralizar o carbono orgânico por causa das altas temperaturas e, assim, reduzem a quantidade do nutriente no solo.

Estudos conduzidos por De Souza Medeiros *et al.*, (2020) comparando os estoques de COS em áreas de sistemas convencionais de culturas anuais e vegetação nativa em oito tipos de solo (tipos estes que representam 96% da região Semiárida Brasileira) em seis municípios dos estados de Alagoas, Bahia e Paraíba, foram encontradas reduções nos estoques de COS dos sistemas agrícolas convencionais de 2, 4, 9 e 13% para 15, 20, 30 e 40 anos, respectivamente, em contraste com os estoques de COS da visegetação nativa. Os autores atribuem essa redução às condições climáticas desfavoráveis e o cultivo contínuo no solo, sem o período de pousio adequado. Além disso, parte dos resíduos vegetais nas áreas agrícolas é consumida pelos animais durante o pastejo após a colheita alterando a dinâmica biogeoquímica entre os compartimentos da MOS e consequentemente prolonga as perdas de estoque de MOS.

A perda de MOS causa, como consequência, a deficiência da fertilidade do solo, diminuição da capacidade de retenção hídrica e perda da estrutura do solo. O cultivo consorciado, que envolve a combinação de diferentes culturas no mesmo espaço, ajuda a combater essas perdas e a manter a qualidade do solo. A exemplo disso, o milho (*Zea mays*) consorciado com outras espécies como feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), fava (*Vicia faba*), abóbora (*Cucurbita spp.*) e amendoim (*Arachis hypogaea*) é comumente consorciado e

essa estratégia favorece o uso eficiente dos recursos não renováveis, promovendo maior sustentabilidade agrícola. Além disso, outro benefício desse tipo de cultivo é a redução da incidência de pragas e doenças e a permissão da diversidade de cultivos, o que faz aumentar as alternativas de fonte de renda na propriedade (Silva e Regitano Neto, 2019).

Os sistemas de produção alternativos e diversificados propõem para o agricultor diferentes fontes de renda, amenizando os riscos decorrentes das prováveis perdas de safra ocorridas constantemente (Silva e Regitano Neto, 2019). Vale salientar ainda que, ao consorciar plantas com características distintas que se complementam, há maior disponibilidade de fitomassa aérea e radicular ao solo, incorporando, ao longo do tempo, compostos orgânicos que mantêm os nutrientes na zona de absorção, favorecendo o bom desenvolvimento do sistema de produção (Melo *et al.*, 2019).

A adoção de uma adubação adequada surge como uma estratégia eficaz para minimizar as perdas de safra, promovendo melhorias na qualidade e na fertilidade do solo, visto que melhora a disponibilidade de nutrientes essenciais, fortalece a estrutura do solo e favorece o desenvolvimento saudável das culturas. O uso de esterco, especialmente na agricultura dependente de chuva, tem se mostrado fundamental. Estudos demonstram que a adição de 3 L m⁻¹ de esterco de caprinos, ao longo da linha de plantio, aumentou a produtividade do milho e do feijão-caupi em 85% e 105%, respectivamente, em latossolo vermelho-amarelo localizado em Pernambuco (Melo *et al.*, 2019).

Resultados satisfatórios também vêm sendo apresentados quanto à produtividade do maracujá amarelo em períodos de seca no município de Catolé do Rocha-PB. Mesquita *et al.* (2024) testaram o uso de silício associado com matéria orgânica visando manter a produção do maracujazeiro amarelo em períodos de seca e obtiveram resultados positivos para as características físico-químicas dos

frutos mesmo em condições de altas temperaturas e déficit hídrico, sendo assim compatíveis com a exigência do mercado para consumo *in natura* e industrial.

Além das questões relacionadas ao solo, o uso de cultivares resistentes às condições do Semiárido Brasileiro promove menor vulnerabilidade dos sistemas rurais. As cultivares de feijão-guandu [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.], como guandu petrolina e guandu taipeiro, foram desenvolvidas e têm como característica a adaptação ao regime irregular de chuvas do Semiárido, com bom potencial produtivo e forrageiro. As cultivares de feijão-caupi BRS Acauã, BRS Tapaihum e BRS Carijó são recomendadas para as condições irrigadas, no segundo semestre, e de sequeiro, no primeiro semestre, no sertão de Pernambuco, na Bahia e no Piauí (Santos, 2011). O algodoeiro do gênero *Gossypium*, seja *G. hirsutum* subsp. *Latifolium* ou *G. hirsutum* subsp. *Marie Gallant* (representantes dos tipos herbáceo e mocó, respectivamente) apresentam tolerância às estações secas, sendo amplamente cultivadas na região do Semiárido Brasileiro (Thomaz *et al.*, 2024).

Além disso, a adoção de técnicas de manejo hídrico tem sido amplamente implementada com o objetivo de melhorar a eficiência no uso da água, visando mitigar os desafios relacionados à escassez na região. Desde 2001, ações de acesso à água vêm ganhando força na região por meio do Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), iniciativa da articulação do Semiárido Brasileiro e a maioria dos municípios possui cisternas e sistemas públicos de irrigação e, onde estas estão presentes, apresentam aumento na produtividade agrícola (Silva *et al.*, 2021). No entanto, não apenas a quantidade de água é preocupante, como também a qualidade hídrica para fins de irrigação deve ser monitorada continuamente, a fim de prevenir a contaminação e, consequentemente, aumentar a produtividade das culturas.

Na região semiárida brasileira, as águas subterrâneas são amplamente exploradas para atender à demanda de atividades

agrícolas (Nunes *et al.*, 2022). Essas nem sempre são de boa qualidade, mas o uso de fontes de água de baixa qualidade na irrigação agrícola é uma alternativa eficaz para lidar com a escassez hídrica (Nunes *et al.*, 2022). No entanto, deve-se haver um sistema de irrigação e plano de manejo adequados para o uso dessas águas, evitando danos aos equipamentos e às culturas.

Em períodos de seca prolongadas, as águas subterrâneas suprem a demanda dos sistemas produtivos e da humanidade. Mas, além das águas subterrâneas, o uso de água salina também pode servir de opção para a irrigação de plantas forrageiras, como a erva-sal (*Atriplex nummularia* Lindl.) e o sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], de maneira a garantir a disponibilidade de alimentos para os rebanhos (Angelotti e Giongo, 2019). Quando o uso de águas salinas se torna necessário, o monitoramento constante dos aspectos do solo e adaptação das plantas à salinidade são essenciais para o conhecimento do desenvolvimento vegetal (Dantas *et al.*, 2023). Como possível solução, a adição de potássio (K) pode reduzir significativamente os danos causados pelo estresse salino nas plantas, além de favorecer a tolerância das culturas à salinidade (Paiva *et al.*, 2024).

Cactáceas forrageiras (*Opuntia ficus-indica* Mill e *N. cochenillifera* (L.) Salm- Dyck) têm elevada adaptação à vida em ambientes secos, no entanto, requerem um mínimo de fornecimento hídrico. Dantas *et al.* (2023) testaram seis níveis de água salina através da irrigação de gotejamento e observaram que *N. cochenillifera* pode ser irrigada água salina de até 10,0 dS.m⁻¹ desde que a suplementação hídrica seja suficiente, aliada à boa drenagem do solo e plantações bem estabelecidas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fitotecnia desempenha um papel essencial na agricultura familiar no Semiárido Brasileiro, ajudando a enfrentar desafios como

a escassez hídrica e as condições climáticas adversas. Envolvendo práticas agrícolas sustentáveis, a exemplo de manejo adequado do solo e o uso eficiente da água, sendo estas fundamentais para aumentar a produtividade e garantir a subsistência das famílias agricultoras.

Além disso, tecnologias sociais, como sistemas de captação de água da chuva, irrigação adaptada e melhoria na qualidade de águas impróprias, têm sido implementadas para melhorar o acesso à água e a produção agrícola. Essas iniciativas promovem a convivência com o Semiárido e ajudam a preservar os recursos naturais da região.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio institucional da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), que fomentou bolsas de estudos, materiais e ambiente para os projetos de pesquisa e extensão. Ao programa de Gestão Ambiental nas Empresas (PGAMEN) pelo incentivo ao nosso projeto, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro à Chamada CNPq/CT- Mineral/CT-Energ nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais Estratégicos e pela concessão de bolsas de estudos dos autores.

REFERÊNCIAS

ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; CARVALHO, A. L.; PINTO, A. S.; CHAGAS, G. A.; OMETTO, J. P. H.; RANDOW, C. V.; SAMPAIO, E. V. S. B. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 367-375, 2016.

ANGELOTTI, F.; GIONGO, V. Ações de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas. Em: MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V.

Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, p. 445-467, 2019.

ANTONINO, A. C. D.; SAMPAIO, E. V. B.; DALL'OLIO, A.; SALCEDO, I. C. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semiárido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 29-34, 2000.

BRASIL. Fourth national communication of Brazil to the United Nations framework convention on climate change. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, DF. 2020.

CAVALLI, Suzi Barletto *et al.* Family farming in times of Covid-19. **Revista de Nutrição**, v. 33, 2020.

CORRÊA, A. C. B.; DE AZEVÊDO CAVALCANTI TAVARES, B.; DE LIRA, D. R.; DA SILVA MUTZENBERG, D.; DE SOUZA CAVALCANTI, L. C. (2019). The semi-arid domain of the northeast of Brazil. In: SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C.; PAISANI, J. C. (Eds.), **The physical geography of Brazil: Environment, vegetation and landscape**, p. 119–150, 2019. Geografia Do Ambiente Físico. Springer International Publishing.

DA COSTA, C. R. G.; SILVA, M. G.; MARQUES, A. L.; MOURA, D. C.; LINHARES, A. C. M.; OLIVEIRA, H. W. G. S.; MOURA, T. A.; SILVA, N. B. F.; PONTES, N. P.; BARBOSA, M. D. G. Organic fertilization as a sustainable alternative in the production of bean varieties in the brazilian semiarid region. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 2, 2024.

DANTAS, F. D. G.; SANTOS, M. V. F. D.; LIMA, G. F. D. C.; COÊLHO, J. J.; MEDEIROS, J. F. D.; CUNHA, M. V. D. Drip irrigation with saline water combined with mulch cover as strategies for forage cactus production in semi-arid zones. **Irrigation Science**, v. 41, n. 2, p. 295-308, 2023.

DE ALENCAR, G. V.; GOMES, L. C.; BARROS, V. M. D. S.; ORTIZ ESCOBAR, M. E.; DE OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. D. S. Organic farming improves soil carbon pools and aggregation of sandy soils in the Brazilian semi-arid region. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 3, p. e13097, 2024.

DE FIGUEREDO, G. M.; SOUSA, C. S.; MESQUITA, E. F.; MESQUITA, F. O.; DINIZ, J. P. C.; BRITO NETO, J. F.; MELO, A. S.; ROCHA, J. L. A. Variability of temperature, rainfall and reference evaporation of Catolé do Rocha-PB municipality, semi-arid region of Brazil. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, v. 7, n. 14, 2024.

DE MEDEIROS, A. S.; CESÁRIO, F. V.; MAIA, S. M. F. Long-term impact of conventional management on soil carbon and nitrogen stocks in the semi-arid region of Brazil: A meta-analysis. **Journal of Arid Environments**, v. 218, 2023.

DE SOUZA MEDEIROS, A.; MAIA, S. M. F.; DOS SANTOS, T. C.; DE ARAÚJO GOMES, T. C. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 287, p. 106690, 2020.

FUJII, K.; HAYAKAWA, C.; PANITKASATE, T.; MASKHAO, I.; FUNAKAWA, S.; KOSAKI, T.; NAWATA, E. Acidification and buffering mechanisms of tropical sandy soil in northeast Thailand. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 80-87, 2017.

GIL, ANTONIO CARLOS. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. 12. reimpr. São Paulo: Atlas, 2009. 175 p.

HOFBAUER, M.; BLOCH, R.; BACHINGER, J.; GERKE, H. H. Effects of shallow non-inversion tillage on sandy loam soil properties and winter rye yield in organic farming. **Soil and Tillage Research**, v. 222, p. 105435, 2022.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth- Science Reviews**, v. 208, p. 103295, 2020.

Instituto Nacional do Semiárido (INSA). **O Semiárido Brasileiro**. Campina Grande, 07 abr. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro>. Acesso em: 07 abr. 2025.

LAURETT, Rozélia *et al.* Sustainable development in agriculture and its antecedents, barriers and consequences—an exploratory study. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 298-311, 2021.

MATZEMBACHER, D. E.; MEIRA, F. B. Sustainability as business strategy in community supported agriculture: Social, environmental and

economic benefits for producers and consumers. **British Food Journal**, v. 121, n. 2, p. 616-632, 2019.

MELO, R. F. de; BRITO, L. T. de L.; PEREIRA, L. A.; ANJOS, J. B. Avaliação do uso de adubo orgânico nas culturas de milho e feijão caupi em barragem subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 6.; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE AGROECOLOGIA, 2., 2009, Curitiba. **Anais**: agricultura familiar e camponesa: experiências passadas e presentes construindo um futuro sustentável. Curitiba: ABA: Socla, 2009. 1 CD-ROM.

MELO, R. F.; GIONGO, V.; DEON, D. S.; ANJOS, J. B. Uso e manejo do solo. Em:

MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V. **Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido**. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 395-444.

MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V. **Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido**. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 467 p.

MESQUITA, E. F.; MESQUITA, F. O.; SOUSA, C. S.; QUEIROZ, L. G.; SOARES, V. C. S.; TARGINO, F. N.; JALES, D. V. D.; BRITO NETO, J. F.; ROCHA, J. L. A.; SOUTO, A. G. L. Silício e adubação orgânica sobre os atributos físico-químicos de frutos de maracujá-amarelo no semiárido Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 100-116, 2024.

MUHIE, Seid Hussen. Novel approaches and practices to sustainable agriculture. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, p. 100446, 2022.

NUNES, K. G.; COSTA, R. N. T.; CAVALCANTE, I. N.; GONDIM, R. S.; LIMA, S. C. R. V.; MATEOS, L. Groundwater resources for agricultural purposes in the Brazilian semi- arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 915-923, 2022.

NUNES, L. A. P. L.; SILVA, D. I. B.; ARAÚJO, A. D. S.; LEITE, L. F. C.; CORREIA, M. E. F. Caracterização da fauna edáfica em sistemas de manejo para produção de forragens no Estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 30-37, 2012.

NUNES, L. A. P.; ARAÚJO FILHO, J. A.; HOLANDA JÚNIOR, E. V.; MENEZES, R. Í. Q. Impacto da queimada e de enleiramento de resíduos orgânicos em atributos biológicos de solo sob caatinga no semiárido nordestino. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, p. 131-140, 2009.

PAIVA, F. J. D. S.; LIMA, G. S. D.; LIMA, V. L. D.; SOUZA, W. B. D.; SOARES, L. A. D. A.; SILVA, F. A. D.; TORRES, R. A. Mineral composition of sour passion fruit cultivated under irrigation with saline water and potassium fertilization. **Revista Caatinga**, v. 37, 2024.

SANTOS, C. A. F. Melhoramento do feijão-caupi para temperaturas moderadas e elevadas no Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 1151-1162, 2011.

SHARP, J.; IMERMAN, E.; PETERS, G. Community supported agriculture (CSA): building community among farmers and non-farmers, **Journal of Extension**, v. 40, n. 3, p. 1-6, 2002.

SILVA, A. F.; REGITANO NETO, A. As principais culturas anuais e bianuais na agricultura familiar. In: MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V. **Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido**. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 45-83.

SILVA, R. M. A.; NUNES, E. M. Agricultura familiar e cooperativismo no Brasil: uma caracterização a partir do Censo Agropecuário de 2017. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 2, 2022.

SILVA, T. A.; FERREIRA, J.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, V. J.; CARMO, S.; CASTRO, J. S. Efficiency of technologies to live with drought in agricultural development in Brazil's semi-arid regions. **Journal of Arid Environments**, v. 192, p. 104538, 2021.

SOUSA, M. G.; ARAUJO, J. K. S.; FERREIRA, T. O.; ANDRADE, G. R. P.; ARAÚJO FILHO, J. C.; FRACETTO, G. G. M.; SANTOS, J. C. B.; FRACETTO, F. J. C.; LIMA, G. K.; SOUZA JUNIOR, V. Long-term effects of irrigated agriculture on Luvisol pedogenesis in semi-arid region, northeastern Brazil. **Catena**, v. 206, 2021.

SOUSA, M. G.; ARAUJO, J. K. S.; FRACETTO, G. G. M.; FERREIRA, T. O.; FRACETTO, F. J. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SOUSA JUNIOR, V. S. Changes in organic carbon and microbiology

community structure due to long-term irrigated agriculture on Luvisols in the Brazilian semi-arid region. **Catena**, v. 212, p. 106058, 2022.

SOUZA, J. T. A.; DA SILVA RIBEIRO, J. E.; ARAÚJO, J. S.; DE FARIAS RAMOS, J. P.; DO NASCIMENTO, J. P.; DE MEDEIROS, L. T. V. Gas exchanges and water-use efficiency of *Nopalea cochenillifera* intercropped under edaphic practices. **Comunicata Scientiae**, v. 11, 2020.

THOMAZ, J. S.; RAMOS, J. P. C.; PEREIRA, R. F.; SANTOS, R. C.; CAVALCANTI, J. J. V. Genetic parameters and selection index in intraspecific cotton lines in a Brazilian semi-arid region. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 24, n. 2, 2024. Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Boletim Climático de Previsão climática sazonal para a região Nordeste do Brasil, ano 5, número 05. 2025.

CAPÍTULO 9

FITOPATOLOGIA NA AGRICULTURA FAMILIAR NO SEMIÁRIDO PARAIBANO

Élida Barbosa Corrêa¹

Amanda de Melo Gonçalves Gaião²

Afonso Barbosa Júnior³

Joélma Nayara Silva Xavier⁴

Sayonara Medeiros Duarte⁵

Maria Valdeane Caetano da Silva⁶

INTRODUÇÃO

Desde a germinação das sementes até a fase de produção, as plantas podem ser afetadas por patógenos (fungos, chromistas, bactérias, viroses, nematoídes) e fatores do ambiente, como excesso ou deficiência de água, de nutrientes e de radiação solar que podem

1 Doutora pelo Curso de Proteção de Plantas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - SP, Professora do Departamento Ciências Agrárias e Ambiental. elida@servidor.uepb.edu.br;

2 Doutora pelo Curso de Fitopatologia, Técnica do Departamento Ciências Agrárias e Ambiental. amandademelgoncalves@gmail.com;

3 Mestrando do Curso de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba – PB. afonso.junior@aluno.uepb.edu.br;

4 Mestranda do Curso de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba – PB. joelma.xavier@aluno.uepb.edu.br;

5 Mestra pelo curso de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba – PB. sayonara.duarte@aluno.uepb.edu.br;

6 Graduanda do curso de Agroecologia da Universidade Estadual da Paraíba – PB. maria.valdeane@aluno.uepb.edu.br.

causar o mau funcionamento das células e tecidos das plantas, resultando em doenças. Doenças podem causar desde a diminuição da produção até a morte das plantas. A ciência que estuda as doenças das plantas, desde a identificação dos agentes causais até as medidas de controle para a diminuição dos danos econômicos aos agricultores e agricultoras é a Fitopatologia (agrios, 2005; Amorim *et al.*, 2016).

Um grande desafio para o desenvolvimento da agricultura familiar no Semiárido Paraibano é a correta identificação e a utilização de medidas de controle eficientes das doenças que afetam as principais culturas de importância socioeconômica. Objetivou-se com este capítulo publicizar as principais doenças incidentes em hortaliças cultivadas no Semiárido Paraibano, dentro da área abrangente dos projetos, e as suas medidas de controle.

METODOLOGIA

As doenças descritas no presente capítulo foram identificadas nos campos de produção de hortaliças [batateira (*Solanum tuberosum*), tomateiro (*Solanum lycopersicum*), coentro (*Coriandrum sativum*), alface (*Lactuca sativa*) e cenoura (*Daucus carota*)] como causadoras de danos a partir do ano de 2013 no âmbito das atividades do Núcleo de Extensão Rural Agroecológica – NERA (CNPq 26/2012 – PRONERA), Centro Vocacional Tecnológico de Agroecologia e Produção Orgânica (CNPq 21/2016) e Grupo de Pesquisa Agrobiodiversidade do Semiárido (@agro_uepb) na região do Território da Borborema.

A identificação das doenças foi realizada com base nos sintomas e nas estruturas reprodutivas (fungos). A doença bacteriana murchadeira foi identificada por meio da sintomatologia e teste de exsudação/tese de copo. As viroses foram identificadas por meio de teste ELISA de folhas apicais (kit SASA, Scotland) e PCR (Agronômica, Porto Alegre, RS) (Correa; Dias, 2023).

DOENÇAS INCIDENTES NAS HORTALIÇAS E O SEU MANEJO INTEGRADO

As principais doenças incidentes nas hortaliças cultivadas pelas famílias agricultoras são descritas como de ocorrência comum nas regiões produtoras no Brasil. O manejo integrado das doenças compreende a utilização de diferentes estratégias de controle, por meio do controle cultural, biológico, genético, físico, alternativo e químico, com o objetivo de diminuir os danos econômicos causados pelas doenças (Amorim *et al.*, 2016).

GALHAS DE NEMATOIDE DAS CULTURAS DA ALFACE, DA CENOURA E DO TOMATE

Plantas atacadas por espécies de nematoide do gênero *Meloidogyne* apresentam diminuição das raízes, subdesenvolvimento, amarelecimento da parte aérea, diminuição da produção e a presença de galhas (engrossamento) nas raízes resultante da infecção da fêmea do nematoide (Figura 1A). Em cenoura, além das galhas, ocorre a bifurcação da raiz pela perda da dominância apical (Figura 1B) (Massola *et al.*, 2016). Como formas de manejo pode-se fazer uso de diversas formas de controle. A seguir serão expostas formas de controle cultural, biológico, genético, físico, alternativo e químico.

• Controle cultural

Escolha de área de plantio sem histórico da doença, mudas sadias (Inoue-Nagata *et al.*, 2016), rotação de culturas com plantas antagônicas [cravo-de-defunto (*Tagetes patula*, *Tagetes minuta* e *Tagetes erecta*), mucuna-preta, crotalária (*Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea* e *Crotalaria breviflora*), erva-de-Santa-Maria (*Dysphania ambrosioides*)] e não hospedeiras (morango, algodão), eliminação dos restos de cultura,

adubação verde com crotalária nas entrelinhas (Ferreira *et al.*, 2021; Massola *et al.*, 2016), incorporação de material orgânico ao solo, como estercos, torta de mamona, resíduos vegetais de cravo-de-defunto, torta de mamona e nim (Ferreira *et al.*, 2021), alqueive (Inoue-Nagata *et al.*, 2016), limpeza de ferramentas e maquinários (Massola *et al.*, 2016).

- **Controle biológico**

Bacillus amyloliquefaciens, *Paecilomyces lilacinus*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis* + *Paecilomyces lilacinus*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus firmus*, *Bacillus velezensis*, *Trichoderma harzianum*, *Purpureocillium lilacinum*, *Pochonia chlamydosporia*, *Bacillus paralicheniformis*, *Bacillus circulans*, *Paenibacillus azotofixans*, *Trichoderma endophyticum* e *Burkholderia rinoensis* (BLoinssumos, 2025).

- **Controle genético**

Uso de cultivares resistentes (Pinheiro *et al.*, 2020; Massola *et al.*, 2016; Inoue-Nagata *et al.*, 2016).

- **Controle físico**

Uso de solarização (D'Addabbo *et al.*, 2010; Inoue-Nagata *et al.*, 2016).

- **Controle alternativo**

Uso de óleos de sementes de mamona, nim, alecrim pimenta, eucalipto, extrato de abóbora (sementes), mamão (sementes) e nim (sementes e folhas) (Neves *et al.*, 2021), extrato de algas marinhas (Williams *et al.*, 2021).

- **Controle químico**

Têm-se, no mercado, fungicidas registrados para cada cultura (Agrofit, 2025).

VIRA-CABEÇA/CHAPÉU DE COURO DAS CULTURAS DA ALFACE E DO TOMATE

O vira-cabeça, também conhecido como chapéu de couro pelos agricultores, é uma doença causada pelo vírus do gênero Tospovírus e é transmitida por tripes (Thysanoptera: Thripidae). Afeta diversas plantas, principalmente em épocas com elevada temperatura, pois intensifica a movimentação do inseto. De elevada ocorrência, a virose pode causar a morte das plantas, principalmente se a infecção for na fase de mudas. A doença causa a deformação das folhas, diminuição do desenvolvimento e produção das plantas, bronzeamento, manchas necróticas e a formação de anéis cloróticos e necróticos (Krause-Sakate *et al.*, 2016; Inoue- Nagata *et al.*, 2016). Em alface, a infecção sistêmica do vírus causa a murcha, amarelecimento, bronzeamento das folhas internas e da nervura (Figura 1C) (Krause-Sakate *et al.*, 2016). Em tomateiro, anéis são formados nas folhas e frutos (Figuras 1D e 1E) (Inoue-Nagata *et al.*, 2016). A seguir, as formas de controle.

- **Controle cultural**

Utilizar mudas sadias (produzidas em ambientes protegidos), não realizar consórcio com pimenta, pimentão, batata (hospedeiras do vírus) e com cebola, alho, ervilha, pimentão (que são hospedeiras do tripe), não realizar o plantio próximo a plantios já instalados com as plantas hospedeiras do vírus e do tripe, *roguing* [retirada de plantas infectadas (colocar as plantas dentro de sacos para evitar a disseminação do inseto para plantas sadias) durante todo o ciclo da cultura] da área

de cultivo, destruição das plantas doentes, rotação de culturas com plantas não hospedeiras (Inoue-Nagata *et al.*, 2016), alqueive de três a quatro semanas após a colheita das plantas (Krause-Sakate *et al.*, 2016).

- **Controle biológico**

Controlar o inseto vetor com *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Orius insidiosus*, *Isaria fumosorosea*, *Pseudomonas chlororaphis* e *Pseudomonas fluorescens* (Bioinsumos, 2025).

- **Controle genético**

Usar cultivares resistentes (Krause-Sakate *et al.*, 2016; Inoue-Nagata *et al.*, 2016).

- **Controle químico**

Fazer uso de inseticida para controle do inseto (Agrofit, 2025).

QUEIMA DAS BORDAS (DEFICIÊNCIA DE CÁLCIO) DA ALFACE

A queima das bordas da alface (Figura 1F) é uma doença fisiológica, causada pela falta de cálcio, que ocorre de forma mais frequente nas plantas adultas. A doença é causada pela ineficiente absorção de cálcio pelas plantas, que têm maior ocorrência em plantas desenvolvidas em áreas com elevada temperatura e luminosidade, excesso de umidade, concentração salina desbalanceada e em plantas com podridão de raiz (Lopes; Guezado-Duva, 1998). A fim de reduzir os danos causados pela doença, formas de controle podem ser aplicadas. São eles:

- **Controle cultural**

Cultivar em temperaturas abaixo de 30°C, diminuir a iluminação com uso de sombrite, correta adubação – manter

balanço adequado dos nutrientes, evitar desbalanço hídrico (excesso e deficiência de água de irrigação) e promover a sanidade das raízes para a melhor absorção dos nutrientes (Lopes; Guezado-Duva, 1998).

- **Controle genético**

Uso de cultivares tolerantes (Lopes; Guezado-Duva, 1998).

PODRIDÃO DE ESCLERÓCIO (*SCLETORIUM ROLFSII*) DA CULTURA DA BATATA

A doença ocorre com sintomas de podridão no colo (Figura 1G), raízes e tubérculos com o desenvolvimento de micélio vigoroso e escleródios (enovelamento da hifa) do fungo (Figuras 1H e 1I) na superfície infectada. A infecção com bactérias que causam a podridão mole é comum nos tubérculos com podridão de esclerócio (Figura 1H). Elevada temperatura, elevada umidade e presença de matéria orgânica não decomposta favorecem o patógeno (Souza Dias *et al.*, 2016).

- **Controle cultural**

É de extrema importância eliminar os restos culturais contaminados, plantar em áreas livres do patógeno, evitar o acúmulo de matéria orgânica, desinfestação dos tubérculos, utilização de batata-semente sadia e rotação de culturas com espécies não hospedeiras (Souza Dias *et al.*, 2016).

- **Controle biológico**

Uso de bactérias como *Bacillus pumilus*, *Bacillus subtilis* e *Bacillus velezensis* (Bioinsumos, 2025).

- **Controle químico**

Ainda não há fungicidas registrados para a cultura da batateira (Agrofit, 2025).

- **Rizoctoniose (*Rhizoctonia solani*) da cultura da batata**

A rizoctoniose é uma doença fúngica que causa o atraso na germinação, subdesenvolvimento das plantas, cancros nas ramas, estolões, raízes e tubérculos (Figura 1J). Nos tubérculos, é possível observar malformação e o desenvolvimento de escleródios que se assemelham a terra aderida (Figura 1K) (Souza Dias *et al.*, 2016). Para mitigar as causas da doenças, pode-se lançar mão de formas de controle como:

- **Controle cultural**

Eliminação dos restos de cultura contaminados, plantio em áreas livres do patógeno, evitar o acúmulo de matéria orgânica, utilização de batata-semente sadia, rotação de culturas com espécies não hospedeiras, plantios rasos e amontoa (Souza Dias *et al.*, 2016).

- **Controle biológico**

Uso de *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus circulans*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus thuriensis*, *Paenibacillus azotofixans*, *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma asperellum*, *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viride*, *Trichoderma afroharzianum* e *Trichoderma hamatum* (Bioinsumos, 2025).

- **Controle alternativo**

Aplicação de óleo essencial de orégano (WU *et al.*, 2023).

- **Controle genético**

Ainda não há cultivares resistentes.

- **Controle químico**

Aplicação de fungicidas registrados (Agrofit, 2025).

PODRIDÃO SECA E MURCHA (*FUSARIUM SPP.*) DA CULTURA DA BATATA

A podridão seca dos tubérculos (Figura 1J) ocorre no campo e na fase de armazenamento. Sintomas de escurecimento do caule, amarelecimento e bronzeamento das folhas e murcha ocorrem nas plantas pela infecção dos fungos. Formas de controle:

- **Controle cultural**

Evitar ferimentos na fase de colheita, plantio em áreas sem a ocorrência da doença, batata-semente sadia, rotação de culturas, desinfestação de equipamentos e evitar estresse hídrico (Souza Dias *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2023).

- **Controle biológico**

Uso de *Bacillus velezensis*, *Trichoderma harzianum*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Trichoderma hamatum* e *Bacillus subtilis* (Bioinssumos, 2025).

- **Controle genético**

Uso de variedades resistentes (Baraka e Asterix) (Souza Dias *et al.*, 2016).

- **Controle químico**

Aplicar tratamento da batata-semente (Agrofit, 2025).

SARNA/SARAMPO (*STREPTOMYCES SCABIEI*) DA CULTURA DA BATATA

A sarna é uma doença bacteriana, também conhecida pelas agricultoras e agricultores como sarampo, ocorre nas raízes, tubérculos, estolões e caule. O principal prejuízo da doença é pelo dano cosmético que ocorre nos tubérculos, resultado das lesões externas nas batatas (Figura 1M). Formas de controle:

- **Controle cultural**

A batata-semente deve estar sadia, rotação de culturas com plantas gramíneas, plantios em solo com pH (ao redor de 5), adubação com sulfato de amônio para redução do pH, evitar estresse hídrico (Souza Dias *et al.*, 2016; Beriam *et al.*, 2020).

- **Controle biológico**

Uso de *Bacillus amyloliquefaciens* e *Bacillus subtilis* (Bioinsumos, 2025).

- **Controle genético**

Uso de cultivares resistentes (Souza Dias *et al.*, 2016; Beriam *et al.*, 2020).

- **Controle químico**

Aplicar fungicidas já registrados (Agrofit, 2025).

MURCHADEIRA (*RALSTONIA SOLANACEARUM*) DA CULTURA DA BATATA

A murchadeira é uma importante doença bacteriana que afeta a batateira devido à elevada agressividade e por impedir que a batata produzida seja utilizada como semente. Os sintomas são

a murcha, escurecimento dos vasos lenhosos e morte das plantas e apodrecimento dos tubérculos com exsudação bacteriana. O teste de exsudação bacteriana com as hastes sintomáticas é utilizado como diagnose da doença (Souza Dias *et al.*, 2016). Abaixo, formas de controle:

- **Controle cultural**

Uso de batata-semente sadia, utilização de áreas com rigoroso controle fitossanitário para a produção de batata-semente, escolha de áreas sem histórico da doença, rotação de culturas por três ciclos ou mais com culturas não hospedeiras como arroz, milho, cana-de-açúcar, pastagens e sorgo, evitar ferimentos nas plantas, eliminação de plantas doentes, desinfestação de equipamentos e utilização de água não contaminada com a bactéria (Souza Dias *et al.*, 2016).

- **Controle alternativo**

Aplicação de óleos essenciais de laranja, canela e gengibre (Hassan *et al.*, 2022), extrato de tabaco (*Nicotiana tabacum*) e cravo-de-defunto (*Tagetes minuta*) (Mutimawurugo *et al.*, 2023).

- **Controle físico**

Fazer solarização do solo com adição de matéria orgânica (Messiha *et al.*, 2007).

- **Controle químico**

Não há agrotóxicos químicos registrados para o controle (Agrofit, 2025).

MOSAICO (POTATO VIRUS Y - PVY) DA CULTURA DA BATATA

O mosaico é causado pelo vírus *Potato virus Y* (PVY) e causa a redução da produção, sendo uma importante doença disseminada pela batata-semente. O PVY é transmitido por espécies de pulgão, sendo o pulgão verde (*Myzus persicae*) o mais importante. Os sintomas da doença dependem da estirpe de vírus e incluem o mosaico foliar, anéis e pontuações necróticas nos folíolos, amarelecimento dos folíolos apicais, enrugamento dos folíolos e diminuição do desenvolvimento dos tubérculos (Souza Dias *et al.*, 2016). Formas de controle:

- **Controle cultural**

Utilização de batata-semente sadia, controle de pulgões, *roguing* de plantas sintomáticas, plantio em área isolada de cultivo de outras solanáceas, plantio em épocas com menor população de pulgões (Sakate *et al.*, 2020).

- **Controle biológico**

Controle através da *Chrysoperla externa* (Bioinsumos, 2025).

- **Controle alternativo**

Aplicação de azadiractina (Agrofit, 2025).

- **Controle genético**

Uso de variedades resistentes (Souza Dias *et al.*, 2016; Sakate *et al.*, 2020).

- **Controle físico**

Cultivar a batata-semente em estufas agrícolas com tela antiafídica (Sakate *et al.*, 2020).

- **Controle químico**

Uso de inseticidas com óleo mineral para o controle do pulgão (Agrofit, 2025).

PODRIDÃO MOLE DOS TUBÉRCULOS, CANELA PRETA E TALO OCO (*PECTOBACTERIUM SPP.*, *DICKEYA SPP.*) DA CULTURA DA BATATA

A podridão mole (Figura 1H) é uma importante doença bacteriana que se expressa principalmente na fase de armazenamento da batata. A canela preta e talo oco ocorrem na fase vegetativa da batateira, inicialmente com o apodrecimento que evolui para o talo oco, causando o amarelecimento, murcha e morte das plantas (Souza Dias *et al.*, 2016). Formas de controle:

- **Controle cultural**

Uso de batata-semente sadia, rotação de culturas com gramíneas, evitar excesso de umidade após a colheita e durante o cultivo das plantas (plantio em leirões/camalhões), redução de lesões nos tubérculos (controle de nematoide e insetos, na fase da amonta e colheita), adubação balanceada (evitar excesso de nitrogênio e falta de cálcio), retirar plantas doentes do campo (Souza Dias *et al.*, 2016; Beriam *et al.*, 2020).

- **Controle alternativo**

Aplicação de óleos essenciais de canela (0.5 µl/ml de cinamaldeído), menta (2.5 µl/ml de mentona), orégano (5–10 µl/ml de carvacrol) (El-Habbak, 2019).

- **Controle químico**

Uso de fungicidas registrados (Agrofit, 2025).

QUEIMA DAS FOLHAS (*ALTERNARIA DAUCI*) NA CULTURA DO COENTRO

A queima das folhas é causada pelo fungo *Alternaria dauci* e pode causar o tombamento das mudas, quando o fungo contamina as sementes. Os sintomas iniciam com manchas foliares que evoluem para a necrose das folhas (Figura 1N) (Reis; Lopes, 2016; Reis; Feitosa, 2023). Para que isso não aconteça, formas de controle devem ser utilizadas. São elas:

- **Controle cultural**

Uso de sementes sadias, adubação adequada para favorecer o desenvolvimento das plantas, evitar irrigação excessiva, aumentar o espaçamento entre as plantas para promover maior secamento das folhas e dificultar a disseminação dos esporos, retirada dos restos culturais da área, evitar plantio próximo a áreas em final de ciclo, rotação de culturas não hospedeiras (gramíneas e leguminosas) (Reis; Feitosa, 2023; Tofoli *et al.*, 2015).

- **Controle biológico**

Aplicação de *Bacillus subtilis* e *Bacillus amyloliquefaciens* (Bioinsumos, 2025).

- **Controle químico**

Uso de fungicida registrado (Agrofit, 2025).

PINTA-PRETA (*ALTERNARIA TOMATOPHILA*) NA CULTURA DO TOMATE

A pinta preta ou mancha de alternária é uma doença fúngica que pode causar elevado prejuízo devido a necrose da área foliar (Figuras 1O e 1P), que resulta em diminuição do tamanho dos

frutos e da produção. O fungo pode contaminar as sementes e causar a morte das mudas pelo apodrecimento do caule (Inoue-Nagata *et al.*, 2016). Para controlar a doença, pode-se utilizar:

- **Controle cultural**

Semeio de sementes e mudas sadias, evitar excesso de umidade (irrigação por gotejamento), rotação de culturas por dois a três anos com gramíneas, incorporação dos restos culturais, retirada de plantas hospedeiras (batateira, joá-de- capote e berinjela) próximos à área de cultivo, cobertura do solo com palhada e adubação equilibrada (Inoue-Nagata *et al.*, 2016).

- **Controle químico**

Uso de fungicidas registrados para a cultura (Agrofit, 2025).

DOENÇAS FISIOLÓGICAS DO TOMATEIRO

Além das já apresentadas, têm-se também as doenças abióticas/fisiológicas que ocorrem por agentes inanimados e os sintomas se expressam em toda a planta, no entanto, maiores são os prejuízos quando os sintomas ocorrem nos frutos. Temperatura e umidade elevadas, excesso de vento, deficiência nutricional e adubação desbalanceada são as principais causas abióticas (Inoue-Nagata *et al.*, 2016). São elas:

FUNDO PRETO/PODRIDÃO APICAL

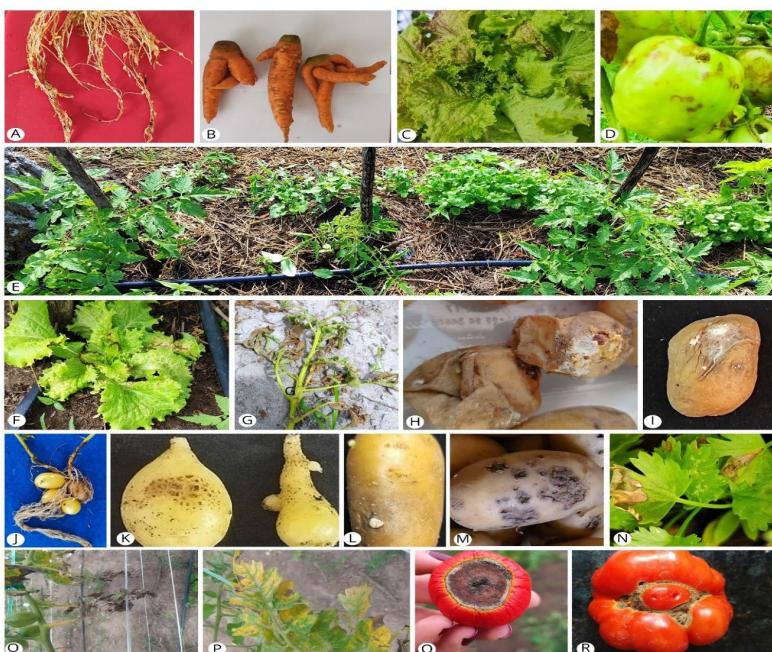
Causada pela deficiência de cálcio em associação com interações com radiação solar, temperatura do solo e do ar, umidade do solo e do ar, salinidade e teor de nutrientes na rizosfera (Figura 1Q). O manejo da doença é por meio da adubação balanceada, calagem

com calcário dolomítico, cultivares tolerantes (controle genético) e manutenção da umidade do solo (Inoue-Nagata *et al.*, 2016).

LÓCULO ABERTO

Causado pela deficiência de boro e ocorre nos frutos desenvolvidos (Figura 1R). O manejo da doença é por meio do uso de irrigação, adubação equilibrada (nitrogênio em excesso compromete a absorção e movimento do boro na planta) e aplicação de bórax (Inoue-Nagata *et al.*, 2016).

Figura 1 - Doenças incidentes nas hortaliças



A - Galha de nematoides em alface; B - Galha de nematoide em cenoura; C - Vira cabeça em alface; D e E - Vira cabeça em tomateiro; F - Queima das bordas em alface; G - Murcha de escleródio em batata-é; H - Podridão mole e de escleródio; I - Podridão de escleródio; J - Rizoctoniose na batata-é; K - Rizoctoniose no tubérculo; L - Fusariose na batata; N - Queima do centro; O e P- Mancha alternaria no tomateiro; Q - Fundo preto no tomate; R - Deficiência de boro no tomateiro.

Fonte: Autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios quanto ao manejo integrado de doenças no Semiárido Paraibano são a insuficiente assistência técnica às famílias agricultoras, a falta de treinamento de profissionais quanto à diagnose para a proteção de plantas e a recomendação de medidas de manejo, pouca disponibilidade de produtos e técnicas alternativas ao controle químico, pois muitas famílias agricultoras utilizam práticas agroecológicas para a produção vegetal.

Nesse sentido, o investimento na realização de pesquisa-ação contextualizada com a demanda das famílias agricultoras é uma alternativa para o aumento da segurança alimentar e da rentabilidade econômica das famílias agricultoras, visto que doenças causam a morte e diminuição da produtividade das plantas, resultando em elevados prejuízos econômicos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual da Paraíba, ao Núcleo de Extensão Rural Agroecológica – NERA (CNPq 26/2012 – PRONERA), ao Centro Vocacional Tecnológico de Agroecologia e Produção Orgânica (CNPq 21/2016), ao Grupo de Pesquisa Agrobiodiversidade do Semiárido (agro_uepb) e ao Programa de Pós- Graduação em Ciências Agrárias.

REFERÊNCIAS

AGRIOS, G. N. (2005). Plant Pathology, 5th Edition. **Elsevier Academic Press**.

AGROFIT – Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Agricultura.gov.br. Disponível

em: <https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 02 mai 2025.

AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. Manual de Fitopatologia. (Eds.). **Editora Agronômica Ceres**, Ouro Fino-MG, v. 2, edição 5, p.697-731, 2016.

BERIAM, L.O.S.; DESTÉFANO. S. A. L.; OCCHIENA, E. M. doenças bacterianas na cultura da batata. In: MERENDA, A. M. C. M. P. **Batata: desafios fitossanitários e manejo sustentável**. São Paulo: CRIAR, 2020. p.87-122.

CORREA, E. B.; DIAS, J. A. C. S. . Observações de baixa incidência de víroles no cultivo de batata (*Solanum tuberosum*) sem controle químico de pragas no agreste paraibano. In: 53 Congresso Brasileiro de Fitopatologia, 2023, Brasília. **Anais**, 2023. Brasília: Associação Brasileira de Fitopatologia, 2023. p. 662-662.

D'ADDABBO, T., MICCOLIS, V., BASILE, M., CANDIDO, V. (2010). Soil Solarization and Sustainable Agriculture. In: Lichtfouse, E. (eds) Sociology, Organic Farming, Climate Change and Soil Science. **Sustainable Agriculture Reviews**, vol 3. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3333-8>

EL-HABBAK, Mohamed; REFAAT, A. A. Evaluation of some essential oils and a nano- Cu-based fungicide against *Pectobacterium carotovorum* causing potato soft rot in Egypt. Egyptian **Journal of Biological Pest Control**, v. 29, p. 5, 2019.

FERREIRA, P. A.; NEVES, W. S.; LOPES, E. A. Controle cultural de nematoides. In: VENZON, M.; NEVES, W. S.; JÚNIOR, T. J. P.; PALLINI, A. Controle alternativo de pragas e doenças: opção ou necessidade? Belo Horizonte: **EPAMIG**, 2021, p. 102- 107.

HASSAN, Eman O.; EL-FIKI, Ibrahim A.; ALI, Masoud A. Antibacterial activity of essential plant oils ex. orange, cinnamon, and ginger in normal nano-emulsion forms against potato bacterial wilt disease caused by *Ralstonia solanacearum*. *NVJAS*, v. 2, n. 5, p. 237-253, 2022. Disponível em: <https://nvjas.journals.ekb.eg/>.

INOUE-NAGATA, A. K.; LOPES, C. A.; REIS, A.; PEREIRA, R. B.; DUVAL-QUEZADO, A. M.; PINHEIRO, J. B.; LIMA, M.

F. Doenças do tomateiro. In. Manual de Fitopatologia. Doenças das Plantas Cultivadas, AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Eds.). **Editora Agronômica Ceres**, Ouro Fino-MG, v. 2, edição 5, p. 697-731, 2016.

KRAUSE-SAKATE, R.; PAVAN, M. A.; MOURA, M. F.; KUROZAWA, C. Doenças da alface. In. Manual de Fitopatologia. Doenças das Plantas Cultivadas, AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Eds.). **Editora Agronômica Ceres**, Ouro Fino-MG, v. 2, edição 5, p. 33-40, 2016.

LOPES, C. A.; GUEZADO-DUVA, A. M. **DOENÇAS DA ALFACE**. Circular Técnica da Embrapa Hortaliças. 14 Dezembro 1998. 20p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/765605/1/CNPHDOCUMENTOS14DOENCASDAALFACEFL07824.pdf>>

MASSOLA, N. S.; PARISI, M. C. M.; GIORIA, R.; JESUS JR, W. C. Doenças da cenoura. In. Manual de Fitopatologia. Doenças das Plantas Cultivadas, AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Eds.). **Editora Agronômica Ceres**, Ouro Fino-MG, v. 2, edição 5, p. 260-261, 2016.

MESSIHA, N. A. S.; VAN DIEPENINGEN, A., WENNEKER, M.; VAN BEUNINGEN, R.; JANSE, J. D.; COENEN, T. G. C.; TERMORSHUIZEN, A. J.; VAN BRUGGEN, A. H. C.; BLOK, W. J. 2007. Biological Soil Disinfestation (BSD), a new control method for potato brown rot, caused by *Ralstonia solanacearum* race 3 biovar 2. **Europe Journal Pathology**, vol. 117, p. 403-415.

MUTIMAWURUGO, Marie Chantal; OGWENO, Joshua Otieno; WAGARA, Nyokabi Isabel; MUHINYUZA, Jean Baptiste; HABIMANA, Sylvestre; MUKAMUHIRWA, Alphonsine. Biological control of potato bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) using selected plant extracts. **Journal of Horticultural Research**, v. 31, n. 2, p. 129-140, 2023. DOI: 10.2478/johr-2023-0031.

NEVES, W. S.; LOPES, E. A.; FERREIRA, P. A. Uso de produtos e extratos vegetais no controle de nematoides. **EPAMIG**, 2021, p.118-124.

PINHEIRO, Jadir B. *et al.* Characterization of lettuce genotypes for resistance to root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.). **Horticultura Brasileira**, v. 38, p. 239-245, 2020.

REIS, A.; FEITOSA, M. I. S. Queima das folhas ou queima de Alternaria em coentro. EMBRAPA: **Comunicado Técnico** 137, 2023.

REIS, A.; LOPES, C. A. **Doenças do coentro no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Hortalícias, 2016. 6 p. (Embrapa Hortalícias. Circular técnica, 157). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/157359/1/CT-157.pdf>>

SAKATE, R. K.; SOUZA-DIAS, J. A. C.; PAVAN, M. A.; NOGUEIRA, A. M.; GIUSTO, A. B. Viroses da baticultura. In: MERENDA, A. M. C. M. P. Batata: desafios fitossanitários e manejo sustentável. São Paulo: **CRIAR**, 2020. p. 153-178.

SOUZA DIAS, J. A. C.; IAMAUTI, M. T.; FISCHER, I. H. Doenças da batateira. In. Manual de Fitopatologia. Doenças das Plantas Cultivadas, AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Eds.). **Editora Agronômica Ceres**, Ouro Fino-MG, v. 2, edição 5, p. 125-148, 2016.

TOFOLI, J. G.; DOMINGUES, R. J.; FERRARI, J. T. *Alternaria* spp. em oleráceas: sintomas, etiologia, manejo e fungicidas. **Divulgação técnica**. Instituto Biológico, v. 77, n. 1, p. 21-34, 2015.

WILLIAMS, T. I.; EDGINGTON, S.; OWEN, A.; GANGE, A. C. Evaluating the use of seaweed extracts against root knot nematodes: A meta-analytic approach. *Applied Soil Ecology*, v. 168, 2021.

WU, T.-L.; ZHANG, B.-Q.; LUO, X.-F.; LI, A.-P.; ZHANG, S.-Y.; AN, J.-X.; ZHANG, Z.-

J.; LIU, Y.-Q. Antifungal efficacy of sixty essential oils and mechanism of oregano essential oil against *Rhizoctonia solani*. **Industrial Crops & Products**, v. 191, p. 115975, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115975>.

XUE, H.; LIU, Q.; YANG, Z.; Pathogenicity, Mycotoxin Production, and Control of Potato Dry Rot Caused by *Fusarium* spp.: **A Review**. **Journal of Fungi**, 2023. 843p.

PARTE III

**ROCHAGEM COM PEGMATITOS
DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**



CAPÍTULO 10

ROCHAGEM UTILIZANDO PEGMATITOS: ASPECTOS ATUAIS

Marília de Macêdo Duarte Moraes¹

Marianna Sodré Ferreira de Sousa²

Lucas Cardoso Vidal de Negreiros³

Kauê Pierry Santos Araújo⁴

Antonio Augusto Pereira de Sousa⁵

INTRODUÇÃO

A agricultura é um pilar essencial da economia brasileira, posicionando o país entre os maiores produtores e exportadores de alimentos do mundo, desempenhando papel importante no abastecimento alimentar mundial (Cavalli *et al.*, 2020). Entre os principais contribuintes para o aumento da produção agrícola estão os nutrientes minerais, que são extraídos do solo a cada colheita e devem ser

-
- 1 Doutora em Agronomia pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Bolsista DTI-A pelo CNPq. mariliaduartebio@gmail.com;
 - 2 Graduanda do Curso de Química da Universidade Federal da Paraíba-UFPB, sodremarianna@gmail.com;
 - 3 Graduando do Curso de Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, lucas.negreiros@aluno.uepb.edu.br;
 - 4 Graduando do Curso de Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, kaue.araujo@aluno.uepb.edu.br;
 - 5 Doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Professor do Departamento de Química - DQ/CCT/UEPB. antonioaugusto@servidor.uepb.edu.br

adequadamente substituídos por fertilizantes, estercos ou outros aditivos (Swoboda; Döring; Hamer, 2022). Dentre os fertilizantes utilizados, os orgânicos e minerais, como nitrogenados, fosfatados e potássicos são os mais comuns. No entanto, a logística, os custos, o impacto ambiental e a forte dependência da importação desses insumos impõem desafios significativos à sustentabilidade do setor (Saab; Paula, 2015).

O uso de fertilizantes químicos convencionais faz parte de um modelo de produção preferencialmente ligado ao agronegócio, que está diretamente relacionado à produção de commodities agrícolas. Na América do Sul (e especialmente no Brasil), o consumo de fertilizantes é muito alto porque os principais países da região (Brasil e Argentina) são considerados agroexportadores, produzindo especialmente soja, milho e trigo, todos altamente demandantes de fósforo e potássio (Manning & Theodoro, 2020).

O Brasil importa cerca de 80% dos fertilizantes que consome, tornando-se dependente de negociações internacionais e vulnerável às oscilações do mercado internacional e às crises geopolíticas (Argenta *et al.*, 2023). Embora possua reservas minerais consideráveis, o país enfrenta entraves na extração e no processamento desses recursos (Cella; Rossi, 2010). Essa dependência externa encarece a produção agrícola, compromete a segurança alimentar e dificulta o planejamento estratégico de longo prazo (Senado Federal, 2022).

Em resposta, alternativas vêm ganhando espaço, como o Plano Nacional de Fertilizantes proposto pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2022), o desenvolvimento de biofertilizantes e o uso de remineralizadores de solo. Essas tecnologias diversificam a matriz de insumos e reduzem a dependência externa (Sá, 2024; Osaki, 2023). Entre essas, destaca-se a técnica de rochagem que, na qual, pós de rochas moídas são aplicados com finalidade de melhorar a fertilidade dos solos agrícolas de forma sustentável.

O reconhecimento oficial da rochagem, no Brasil, ocorreu com a Lei nº 12.890/2013, que regulamentou o uso de remineralizadores e condicionadores de solo, criando um marco legal para sua produção e comercialização. Desde então, a pesquisa científica sobre diferentes tipos de rochas, como basaltos, sienitos e filitos, tem avançado, com resultados positivos principalmente em solos tropicais intemperizados (Silva *et al.*, 2022).

Entre as rochas de interesse, os pegmatitos (ricos em feldspatos e micas) são considerados remineralizadores e corretivos de solo. A liberação lenta e contínua de nutrientes no solo promove efeito residual duradouro, reduz a necessidade de reaplicação e minimiza perdas por lixiviação (Luchese *et al.*, 2021). Em solos tropicais, como os latossolos brasileiros, a aplicação desses materiais pode corrigir a fertilidade e melhorar as condições físico-químicas.

Além disso, a abundância de pegmatitos em regiões minadoras como o Vale do Jequitinhonha (MG), Seridó (RN/PB) e Nordeste de Goiás representa uma oportunidade logística e econômica. Esses corpos geológicos são ricos em minerais como quartzo, feldspato, mica e, em alguns casos, amazonita, cujos rejeitos e subprodutos podem ser utilizados como fontes alternativas de nutrientes para a agricultura. A amazonita, por exemplo, é derivada da mineração de pegmatitos e apresenta potencial para a biossolubilização de potássio, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis (Nascimento *et al.*, 2023). Além desta, mica xisto se destaca na compostagem agrícola, evidenciando sua contribuição como fonte de potássio e sua integração eficiente com resíduos orgânicos (Höfig *et al.*, 2023). Assim, o aproveitamento desses subprodutos não só agrega valor a cadeias produtivas já estabelecidas, como também reduz passivos ambientais.

Portanto, a disponibilidade de fertilizantes no Brasil é uma questão estratégica para a segurança alimentar e a sustentabilidade da agricultura nacional. A rochagem, especialmente com o uso de

pegmatitos, desponta como uma alternativa viável e promissora para fortalecer a autonomia do setor agrícola brasileiro, reduzindo a dependência externa e promovendo práticas mais sustentáveis (Oliveira et. al., 2023).

Diante do exposto, buscar alternativas socioeconômica e ambiental sustentável tem sido um desafio para os órgãos de política pública e de pesquisa, onde avançar com a técnica de rochagem tem demonstrado grande interesse para o desenvolvimento e progresso do setor do agronegócio brasileiro. Esta revisão bibliográfica tem como objetivo discutir os aspectos atuais de estudos que abordam a questão norteadora de rochagem utilizando o potencial da mineração de pegmatitos, como uma rota tecnológica viável a ser aplicada como remineralizador e/ou corretivo de solo na agricultura do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo se configura como uma análise bibliográfica que teve como propósito reunir informações presentes em publicações científicas, explorando a questão norteadora da rochagem utilizando pegmatitos, com destaque aos estudos que abordam a região da Província Pegmatítica da Borborema.

Para isso, foram realizadas buscas em bases acadêmicas, como Google Acadêmico, *ResearchGate*, *CAS SciFinder* e Scopus, considerando artigos publicados nos últimos quinze anos. A pesquisa utilizou os seguintes termos-chave: “Rochagem”, “Fertilizantes”, “Pegmatitos”, “Província Pegmatítica da Borborema”. Inicialmente, os artigos foram selecionados com base na leitura dos resumos, incluindo na análise aqueles que abordavam temas relevantes para a pesquisa.

Foram compostas 4 questões, Research Question (RQ), para serem abordadas na pesquisa: “RQ1: O que é e como é feita a rochagem?”, “RQ2: O que são pegmatitos e quais suas características

relevantes para a rochagem?”, “RQ3: Como os pegmatitos da PPB têm sido investigados?” e “RQ4: Quais tipos de pegmatitos têm sido testados como fertilizantes?”.

Os critérios de inclusão e exclusão adotados para a elaboração desta revisão estão detalhadamente apresentados no quadro 1.

Quadro 1- Relação dos critérios de inclusão e exclusão de trabalhos

| Critérios de inclusão | Critérios de exclusão |
|---|---|
| 1. Trabalhos publicados entre 1 de janeiro de 2010 e 31 de dezembro de 2024; 2. Trabalhos que investiguem a técnica de rochagem com pegmatitos; 3. Trabalhos que falem sobre pegmatitos e pegmatitos na Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil; 4. Trabalhos publicados em português ou inglês; 5. Trabalhos com mais de 4 páginas; 6. Trabalhos disponíveis online. | 1. Trabalhos duplicados; 2. Trabalhos que não abordem a área da Província Pegmatítica da Borborema; 3. Trabalhos sem relação com minérios presente na área da Província Pegmatítica da Borborema; 4. Trabalhos que não foram publicados no período estabelecido; 5. Trabalhos com menos de 4 páginas; 6. Dissertações e/ou teses e/ou relatórios técnicos e/ou livros. |

Fonte: Própria.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a busca nas bases de dados, foram identificados 3.971 artigos relacionados ao tema. No entanto, após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 19 artigos foram selecionados para compor esta revisão narrativa da literatura.

Mesmo tendo os fertilizantes como foco de uso para colheitistas, ainda assim existem questões que fazem com que a técnica de rochagem seja utilizada e aplicada na indústria, além do benefício do reaproveitamento de pegmatitos. Com isso, seguindo os estudos achados, é possível entender sobre os aspectos foco a seguir.

RQ1: O que é e como é feita a rochagem?

A técnica de rochagem consiste no reaproveitamento de rejeitos de mineração para a fertilização do solo, onde a aplicação de rochas moídas diretamente ao solo tem a finalidade de manejar a fertilidade e otimizar a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas (Belotti *et al.*, 2024).

Assim, é considerada uma técnica sustentável que tem como objetivo diminuir o uso de insumos químicos, aumentando os parâmetros de fertilidade sem afetar o equilíbrio ambiental, usando rochas silicáticas moídas (pó de rocha) e micronutrientes no solo para promover a nutrição contínua do solo e das plantas como, por exemplo, o potássio (Brito *et al.*, 2019; Cola *et al.*, 2012). O pó de rocha pode ser utilizado como remineralizador aumentando a retenção de água e atividade microbiológica no solo, além de alterar positivamente os parâmetros de fertilidade, sem afetar o equilíbrio ambiental (Brito *et al.*, 2019).

Antes do advento dos fertilizantes solúveis, rochas silicatadas eram utilizadas, mas que foram sendo menos utilizadas ao longo do tempo. Agora, com maior necessidade nutricional tendo como foco o potássio (K), reaproveitamento de produtos remanescentes de mineradoras, entre outros, a rochagem mostra-se efetiva através do uso de rochas que possuem nutrientes importantes para plantas e solos em sua composição (Theodoro, 2011). Para ser utilizada como remineralizadora, a rocha passa por processos de quebra e até formar-se pó que é depositado no solo e ajuda a rejuvenescer solos que foram lixiviados ou que são pobres de nutrientes (Belotti *et al.*, 2024).

O pó de rocha libera lentamente macro e micronutrientes resultando em um efeito salino mínimo em comparação com fontes convencionais (Medeiros *et al.*, 2023), sendo assim menos suscetíveis à perda de nutrientes por lixiviação e possui um efeito residual

maior no solo, reduzindo a necessidade de fertilizantes e o tempo gasto em manejo e mão de obra. Além disso, são conhecidos por sua capacidade de captura de carbono, ou seja, em vez de emitirem gases com efeito de estufa, eles capturam e armazenam carbono atmosférico no solo (Medeiros *et al.*, 2023).

RQ2: O que são pegmatitos e quais suas características relevantes para a rochagem?

Os pegmatitos são rochas ígneas que se formam no estágio final da cristalização do magma e consiste em cristais de feldspato, mica e quartzo com composição semelhante ao granito, especialmente ao pegmatito granítico (Nana *et al.*, 2024). De granulação extremamente grossa, podem apresentar outras composições como óxidos (provados pela presença de cassiterita e columbita), sulfatos (pirita, arsenopirita), fosfatos (apatita, frondelita) e silicatos (turmalina, berilo) a partir de suas variações (Belotti *et al.*, 2024).

Também possuem uma abundância de cristais e hábitos de intercrescimento fortemente direcionais. Segundo London (2008 apud Sales, 2016), pegmatitos são definidos como:

[...] rochas ígneas de composição granítica, as quais se distinguem de outras rochas magmáticas por sua granulação extremamente grossa ou por abundância de cristais exibindo textura gráfica ou com hábitos de intercrescimento fortemente direcionais, além de possuir zoneamentos minerais bem definidos.

São, então, rochas variadas e fáceis de distinguir por suas características únicas. Esses zoneamentos presentes ajudam a identificar os tipos de pegmatitos, sendo possível dividi-los em grupos a partir da sua utilidade ou raridade – grupos dependentes dos tipos e quantidades de minerais presentes compondo a rocha – onde

posteriormente serão distribuídos no mercado para seus respectivos fins industriais.

Assim, utilizar pegmatitos, que contêm Potássio (K), Cálcio (C), Fósforo (P), Magnésio (Mg), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Ferro (Fe) (Belotti et. al., 2024), é uma forma alternativa de fonte de matéria-prima tornando-a mais acessível, reduzindo assim a necessidade de importação destas para fabricação de fertilizantes, o que acarreta grandes custos e é sabido o quanto o país é dependente (Lopes, 2010) para elevar a produtividade das culturas de modo geral. Além do potencial nutricional, os pegmatitos podem ser considerados como a mudança no conceito de manejo da fertilidade do solo em agroecossistemas, visto que esta ação gera inovação a partir do melhor uso de produtos minerais e inovação agrícola por meio do uso racional dos recursos naturais.

RQ3: Como os pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB) têm sido investigados?

Sendo reconhecida como uma das áreas mais ricas em pegmatitos do Brasil, a Província Pegmatítica da Borborema (PPB) está localizada na região Nordeste abrangendo partes do Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Estes corpos rochosos têm sido investigados sob diferentes aspectos, principalmente relacionados à mineralogia, aos impactos ambientais da mineração artesanal e à importância econômica desses recursos.

A extração dos pegmatitos na PPB é feita por garimpeiros, conforme estudo que teve como objetivo investigar os aspectos ambientais dessa atividade (Sales, 2016). Analisar geologicamente o local é de extrema importância para identificar quais minerais estão presentes. Isto facilita na identificação da rocha, tornando o processo de análise mais eficiente, o que significa que pode ser destinado à indústria de maneira mais rápida. No caso da PPB, é possível

classificar os pegmatitos de 3 formas diferentes, sendo eles heterogêneo, homogêneo e misto (Santos *et al.*, 2018).

Diversos estudos têm caracterizado a composição dos pegmatitos da PPB como foco na presença de minerais importantes em aspectos industriais e tecnológicos, como o quartzo, feldspato, mica e espodumênio. As técnicas de análise são feitas por meios como Microscopia por Luz Transmitida e Refletida (MLT e MLR respectivamente), utilizadas para realizar um estudo petrográfico; microssonda eletrônica, para obter a caracterização química dos minerais presentes; difração de raios-x (DRX), utilizada para identificar os minerais pulverizados presentes; e fluorescência de raios-x (FRX), utilizada para identificar e quantificar elementos químicos presentes nas amostras (Belotti *et al.*, 2024).

A mineração artesanal que, muitas vezes, é feita sem controle técnico, tem causado degradação ambiental significativa, como o desmatamento, a erosão e até contaminação de corpos d'água. Com isso, pesquisadores vêm se interessando e analisando tais efeitos, buscando desenvolver modelos de exploração mais sustentáveis, visando aproveitar os produtos remanescentes e reduzir os danos causados ao meio ambiente (Sales *et al.*, 2016).

Há um interesse crescente no aproveitamento de remanescentes da mineração como alternativa para a produção de fertilizantes nacionais, o que reforça a importância da região no contexto da segurança alimentar e da redução de dependência externa (Belotti *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2018). Considerando então um ponto de vista econômico, os pegmatitos da PPB são fontes importantes de minerais amplamente utilizados, como em eletrônicos, cerâmicas e fertilizantes, sendo uma das bases da economia de pequenos municípios do Nordeste brasileiro. Além de que extração de minérios como lítio, tantalita e feldspato contribui diretamente para a geração de renda local.

RQ4: Quais tipos de pegmatitos têm sido testados como fertilizantes?

Resultados positivos com o uso dos pegmatitos se acumulam, principalmente, no Brasil, que atualmente é o epicentro da pesquisa e onde o movimento ‘Rochagem’ levou à institucionalização do uso de pós de rocha na agricultura (Swoboda; Döring; Hamer, 2022). Assim, estudos têm sido desenvolvidos com objetivo de avaliar seu potencial como fertilizantes naturais e mostram que os pegmatitos, principalmente, os que são ricos em feldspato, mica e espodumênio, fornecem ao solo nutrientes importantes.

Estudos recentes como o de Belotti *et al.* (2024) e Sales *et al.* (2016), visando utilizar produtos remanescentes de pegmatitos com finalidade para fertilizantes investigam o uso de pegmatitos com alta concentração de minerais como Ca, Fe, K, Mg, Mn e P na fertilização do solo. Pesquisas que abordam o uso de pegmatitos alcalinos, como os monzogranitos ricos em feldspato potássico também têm sido desenvolvidas. O material foi testado em cultivos de milho e trigo, onde obtiveram resultados positivos, como o aumento da disponibilidade de K no solo (Bamberg *et al.*, 2023). Os resultados apontam que essas rochas, quando moídas adequadamente, apresentam, de maneira gradual, boa capacidade de liberação de nutrientes, o que promove benefícios à estrutura e fertilidade do solo.

Assim, essa é uma alternativa viável para a diminuição de uso dos fertilizantes solúveis tradicionais, que tendem a ser rapidamente lixiviados ou absorvidos pelas plantas. Os remineralizadores de origem pegmatítica promovem uma liberação lenta e contínua de nutrientes, favorecendo o equilíbrio nutricional e a fertilidade do solo de maneira mais sustentável (Cola *et al.*, 2012).

Além disso, alguns corpos pegmatíticos podem apresentar minerais acessórios, como no caso dos fosfatos (apatita, frondelita, eosforita) e diversos outros, e essas rochas podem conter elementos

nutrientes necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Belotti *et al.*, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da crescente demanda por soluções sustentáveis na agricultura e da forte dependência do Brasil em relação à importação de fertilizantes, a rochagem tem se destacado como uma alternativa estratégica e promissora. Nesse contexto, o uso de pegmatitos como remineralizadores de solo representa uma abordagem inovadora, especialmente em regiões como a Província Pegmatítica da Borborema (PPB), que se destaca pela abundância dessas rochas com elevado potencial agronômico.

No entanto, ao buscar estudos sobre o uso de pegmatitos na rochagem, especificamente na região da PPB, observou-se uma escassez significativa de referências compatíveis. Os materiais encontrados não atendiam a todos os critérios definidos para a pesquisa, sendo a ausência de estudos realizados diretamente na área em questão o aspecto menos contemplado. Essa lacuna evidencia a necessidade de maior atenção científica voltada para o potencial agrícola dos pegmatitos da região.

Ainda assim, os dados disponíveis reforçam a viabilidade do uso de pegmatitos como fontes naturais de macro e micronutrientes essenciais à fertilidade dos solos tropicais. Além de contribuírem para a nutrição vegetal, esses materiais também podem representar uma alternativa para o reaproveitamento de subprodutos da mineração, reduzindo passivos ambientais e promovendo o desenvolvimento de economias locais.

Dessa forma, destaca-se a importância de ampliar os estudos técnico- científicos voltados ao uso agrícola dos pegmatitos da PPB, especialmente por meio de ensaios de campo e avaliações agronômicas. A integração entre ciência, tecnologia e políticas públicas será

essencial para consolidar essa rota tecnológica, contribuindo para uma agricultura mais sustentável, resiliente e menos dependente de insumos externos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, que ofereceu infraestrutura e suporte, bem como à agência de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro à Chamada CNPq/CT- Mineral/CT-Energ nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais estratégicos.

REFERÊNCIAS

ARGENTA, C.V.; BRUM, A.L; ALLEBRANDT, S.L.; MUELLER, A. A. A realidade do mercado de fertilizantes no Brasil: uma breve análise. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. I.], v. 16, n. 3, p. 1-17, 2023. DOI: 10.17765/2176- 9168.2023v16n3e10998.

BAMBERG, A. L.; MARTINAZZO, R.; SILVEIRA, C. A. P.; PILLON, C. N.; STUMPF, L.; BERGMANN, M.; STRAATEN, P. van.; MARTINS, E. de S. Selected Rock Powders as Sources of Nutrients for Soil Fertilization and Maize-Wheat Grain Production in Southern Brazil. **The Journal of Agricultural Science**, [S. I.], v. 161, n. 5, p 654-668, 2023. DOI: 10.1017/S002185962300062X.

BELOTTI, F. M.; CIPRIANO, R. A. S. Caracterização mineralógica de rejeito de pegmatito e seu potencial para rochagem. **Caderno Pedagógico**, [S. I.], v. 21, n. 6, p. 01-13, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n6-042.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Regulamenta o uso de remineralizadores de solo e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 11 dez. 2013.

BRITO, R. S.; BATISTA, J. F.; MOREIRA, J. G. V.; MOREAES, K. N. O.; SILVA, S. O. Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 528-540, 2019. ISSN: 2446-4821.

CAVALLI, Suzi Barletto *et al.* Family farming in times of Covid-19. **Revista de Nutrição**, v. 33, 2020.

CELLA, D.; ROSSI, M. C. de L. Análise do mercado de fertilizantes no Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, SP, v. 7, n. 1, p. 41-50, 2010.

COLA, G. P. A.; SIMÃO, J. B. P. Rochagem como forma alternativa de suplementação de potássio na agricultura agroecológica. **Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. I.], v. 7, n. 4, 2012. ISSN: 1981-8203.

HÖFIG, P.; MARTINS, E.S.; GIASSON, E.; ARANTES, B. S. Diferentes rochas moídas no processo de compostagem em Unaí/MG: fertilizante orgânico e autonomia agrícola. **Geographia Opportuno Tempore**, [S. l.], v. 9, n. 1, 2023.

LOPES, S. A. Superfosfatos simples e outros fertilizantes fosfatados solubilizados industrialmente via rota do ácido sulfúrico. **São Paulo: Gráfica Nagy**, 2010.

LUCHESE, A.V.; PIVETTA, L.A.; BATISTA, M. A.; STEINER, F.; GIARETTA, A. P. S.;

CURTIS, J. C. D. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal Of Agricultural Research**, v. 17, p. 487-497, 2021.

MANNING, D. A.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, 480-487, 2020.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Fertilizantes**. Disponível em: <https://www.gov.br>. Acesso em: 18 mar. 2025.

MEDEIROS, F. D. P.; CARVALHO, A. M. D.; GINDRI RAMOS, C.; DOTTO, G. L.; CARDOSO, I. M.; THEODORO, S. H. Rock Powder enhances soil nutrition and coffee quality in agroforestry systems. *Sustainability*, v. 16, n. 1, p. 354, 2023.

NANA, A.; SAKUE, E. N.; VENYITE, P.; ANENSONG, S. C. D.; EPEY, N.; ADEDIRAN,

A. A.; KAMSEU, E.; LEONELLI, C.; LEONELLI, C. Effect of milled pegmatite quarry wastes powders on structure, microstructure and mechanical properties of pegmatite- based geopolymers. *Materialia*, v. 33, 2024.

NASCIMENTO, M. R. F.; ROCHA, D. L.; VIDEIRA, S. S.; DE SOUZA, I. M.; CUNHA, C. D. Biossolubilização de rochas e resíduos de rochas como fontes alternativas de fertilizantes para a agricultura. *Revista Ensaios Pioneiros*, [S. I.], v. 7, n. 2, 2023.

OLIVEIRA, T. J. A.; DORNER, S. H.; ALMEIDA, R. E. M. A DEPENDÊNCIA DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO EM RELAÇÃO AOS FERTILIZANTES IMPORTADOS / The dependence of Brazilian agribusiness on imported fertilizers. *Informe GEPEC*, [S. I.], v. 27, n. 1, p. 363-383, 2023. DOI: 10.48075 /igepec.v27i1.30129.

OSAKI, Mauro. Com forte dependência do mercado externo, setor nacional de fertilizantes. **IDEA Online**, 2025.

SAAB, A. A.; PAULA, R. A. O mercado de fertilizantes no Brasil diagnósticos e propostas de políticas. *Revista de Política Agrícola*, [S. I.], v. 17, n. 2, p. 5-24, 2015. Disponível em: <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/404>. Acesso em: 3 maio. 2025.

SALES, E. D. G.; SANTOS, L. N.; VIEIRA, F. F. Revisitando o pegmatito alto serra branca, município de Pedra Lavrada (PB): mapeamento geológico, aspectos de campo e zoneamento mineral. *HOLOS*, [S. I.], v. 8, p. 397-407, 2016.

SANTOS, R. Y. O.; LISBOA, V. A. C.; OLIVEIRA, J. R. S.; BARROS, T. S. C.; SANTOS, T. J. C.; BARROS, P. S. C. Mapeamento Geológico do Pegmatito Alto do Urubu, município de Picuí (PB), Faixa Seridó, Província Pegmatítica da Borborema. **Revista Principia**, [S. l.], v. 1, n. 43, p. 222-233, 2018. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n43p222-233.

SENADO FEDERAL. Governo: dependência externa de fertilizantes vai continuar nos próximos anos. **Agência Senado**, 24 maio 2022.

SILVA, V. A.; SILVA, A. A.; SILVA, J. P.; SANTOS, H. O.; OLIVEIRA, F. S.; SOBRINHO SANTOS, E. M. Mineralogical analysis of rock dust for remineralization of soil intended for pasture. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n.2, p. 1-13, 2022.

SÁ, M. Dependência de fertilizantes importados deve se manter a longo prazo. **Sociedade Nacional de Agricultura (SNA)**, 2024.

SWOBODA, Philipp; DÖRING, Thomas F.; HAMER, Martin. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of The Total Environment**, v. 807, 2022.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. Rochagem: Uma Questão De Soberania Nacional. **XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica**, Rio Grande do Sul, Gramado, 2011.

CAPÍTULO 11

CARACTERIZAÇÃO DE PEGMATITOS E XISTOS DA REGIÃO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Hilda Camila Nascimento Nogueira¹

Maria Barbosa da Silva Cordeiro²

Jamile Bezerra Leite dos Santos³

Marianna Sodré Ferreira de Sousa⁴

Antonio Augusto Pereira de Sousa⁵

REFERENCIAL TEÓRICO

DESAFIOS DA AGRICULTURA BRASILEIRA E A DEPENDÊNCIA DE POTÁSSIO

A agricultura brasileira enfrenta o desafio de garantir o fornecimento adequado de macronutrientes, especialmente o potássio, essencial para o crescimento vegetal. A elevada dependência de fontes externas desse nutriente representa uma vulnerabilidade significativa ao agronegócio, tornando a produção agrícola suscetível

1 Doutora em Ciências (UNICAMP). Pesquisadora pelo Paul Scherrer Institute (PSI). hildacamila@hotmail.com;

2 Mestra em Química (UEPB). Pesquisadora pela UEPB. maria.barbosa.silva.cordeiro@aluno.uepb.edu.br;

3 Graduanda de Química Industrial (UEPB). jamile.leite@aluno.uepb.edu.br;

4 Graduanda de Bacharelado em Química (UFPB). sodremarianna@gmail.com;

5 Doutor em Engenharia de Processos (UFCG). Professor do Departamento Química (DQ/CCT/UEPB). antonioaugusto@servidor.uepb.edu.br.

à volatilidade dos preços internacionais e à instabilidade cambial (Santos & Barbosa, 2019). A escassez de reservas nacionais acentua essa fragilidade, reforçando a necessidade de políticas públicas voltadas ao estímulo da produção interna e à busca por fontes alternativas.

Nesse cenário, o uso de rochas e minerais como insumos agrícolas tem ganhado destaque como alternativa viável e sustentável. Esses materiais são ricos em nutrientes essenciais, como o potássio (K) e o fósforo (P), elementos fundamentais para processos fisiológicos nas plantas, incluindo a fotossíntese, o metabolismo energético e o transporte de nutrientes (Marschner, 2012; Vance, Uhde-Stone & Allan, 2003).

Reconhecendo esse potencial, a Lei 12.890, de 10 de dezembro de 2013, passou a regulamentar e incentivar o uso do pó de rocha como fertilizante, autorizando sua aplicação como substituto parcial ou total dos fertilizantes químicos tradicionais (Brasil, 2013). Dentro dessa abordagem, destaca-se a prática da rochagem – aplicação de rochas moídas ao solo – que contribui não apenas com a adição de nutrientes, mas também com a recuperação e formação do solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas.

Ao reiniciar os processos naturais de formação do solo, a rochagem oferece ganhos sustentáveis de fertilidade a longo prazo, alinhando-se às exigências por uma agricultura mais resiliente, eficiente e menos dependente de insumos externos (Brito *et al.*, 2019).

A PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA COMO FONTE DE NUTRIENTES

Inserida nesse contexto, destaca-se a Província Pegmatítica da Borborema (PPB), localizada no Nordeste do Brasil, como uma área de interesse para o fornecimento de nutrientes minerais. A região é caracterizada pela presença abundante em xistos e pegmatitos, rochas que contêm diversos minerais, como feldspatos e micas,

reconhecidos por sua capacidade de liberação de potássio (K) e fósforo (P) ao solo (Luz *et al.*, 2003; Nunes *et al.*, 2018).

Estudos realizados na PPB indicam que esses minerais apresentam significativo potencial agronômico, especialmente no que se refere à melhoria da fertilidade dos solos e ao consequente aumento da produtividade agrícola (Beurlen *et al.*, 2008).

Além do uso direto dos pegmatitos como insumo, pesquisas recentes têm se voltado para o reaproveitamento dos resíduos da mineração, os quais frequentemente são descartados. A incorporação desses rejeitos ao uso agrícola representa uma estratégia alinhada à sustentabilidade, uma vez que reduz o impacto ambiental da mineração e valoriza recursos minerais subutilizados (Diego, Adão & Marcelo, 2008; Araujo, 2024).

SOLUBILIDADE DOS MINERAIS E MÉTODOS DE MELHORAMENTO

Apesar do potencial observado, a baixa solubilidade natural dos minerais presentes nas rochas potássicas limita a disponibilização efetiva de nutrientes para as plantas. A liberação dos nutrientes pode ocorrer em taxas muito lentas, limitando sua eficácia agronômica em curto e médio prazos. Essa limitação representa um dos principais entraves para o uso direto desses materiais como fertilizantes alternativos (Aquino *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2016).

Para superar a baixa solubilidade dos minerais potássicos, têm sido estudadas técnicas de ativação mineral, como o tratamento térmico e o uso de agentes fundentes, a exemplo do cloreto de cálcio. Essas estratégias promovem alterações na estrutura cristalina dos minerais, favorecendo a liberação de nutrientes. Em especial, o tratamento térmico tem se mostrado eficaz na solubilização do potássio em rochas ricas em feldspato, ao aumentar a reatividade dos minerais por meio de aquecimento controlado (Martins *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018).

No entanto, o sucesso dessas técnicas está diretamente relacionado ao conhecimento detalhado da composição mineralógica das rochas. A caracterização mineralógica é essencial para compreender o comportamento dos minerais frente aos tratamentos aplicados. Esse conhecimento permite ajustar os parâmetros do processo térmico (como temperatura, tempo de calcinação e uso de fundentes) de maneira mais eficaz, garantindo melhores resultados na liberação de nutrientes (Paludo *et al.*, 2018). Assim, a integração entre a caracterização mineralógica e os métodos de ativação representa um caminho estratégico para o desenvolvimento de fertilizantes alternativos de base mineral, com maior eficiência e sustentabilidade.

Diante desse panorama, este estudo propõe uma abordagem integrada para o aproveitamento de recursos naturais nacionais, com foco nos pegmatitos e xistos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), reconhecidos por seu potencial como fontes alternativas de potássio (K) e fósforo (P). Considerando os desafios relacionados à baixa solubilidade natural desses minerais, bem como a importância da caracterização mineralógica para otimizar estratégias de ativação, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial agronômico desses materiais.

Para isso, são realizadas análises mineralógicas e térmicas, visando compreender sua capacidade de liberação de nutrientes e, assim, contribuir para o desenvolvimento de insumos agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

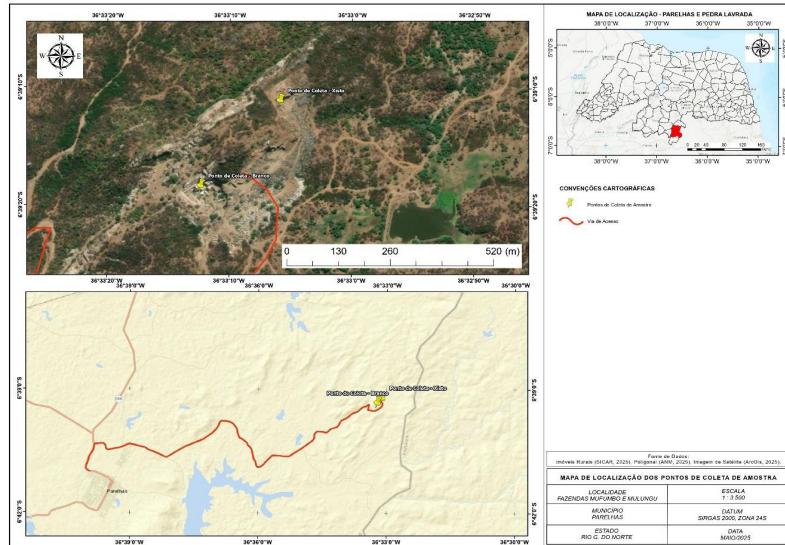
METODOLOGIA

A elaboração deste estudo iniciou-se com uma revisão bibliográfica detalhada sobre a geologia da Província Pegmatítica da Borborema, com o objetivo de identificar formações geológicas relevantes e subsidiar a seleção criteriosa de pontos de amostragem. Essa etapa foi fundamental para garantir a representatividade das

amostras coletadas, com base nas características litológicas e mineralógicas predominantes da região.

As coletas de campo foram realizadas no período sazonal seco, entre os meses de junho e julho de 2024, em uma pedreira situada no Sítio Mufumbo, município de Parelhas/RN, inserida no contexto geológico do Cinturão Seridó. Foram coletadas amostras de aproximadamente 0,5 kg de xisto e pegmatito, totalizando duas amostras principais. Os pontos de coleta foram definidos a partir de inspeções in loco, considerando a acessibilidade, o estado de exposição dos afloramentos e a diversidade mineralógica observada, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Mapas de localização da área de estudo no Sítio Mufumbo, município de Parelhas/RN. A imagem inclui (i) ortofoto da pedreira com marcação dos pontos de coleta de amostras de xisto e pegmatito, (ii) via de acesso utilizada na campanha de campo e (iii) mapa do estado com a localização do município de Parelhas



Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados de campo (2024) e imagens de satélite.

Após a coleta, as amostras de pegmatitos e xistos foram preparadas em laboratório, passando por processos de pulverização, quarteamento e homogeneização, de forma a assegurar a uniformidade e reproduzibilidade dos ensaios subsequentes. Para a caracterização química e mineralógica, as amostras foram submetidas a diferentes técnicas analíticas complementares: difração de raios X (DRX); fluorescência de raios X (FRX) e análises termogravimétricas (TG/DSC).

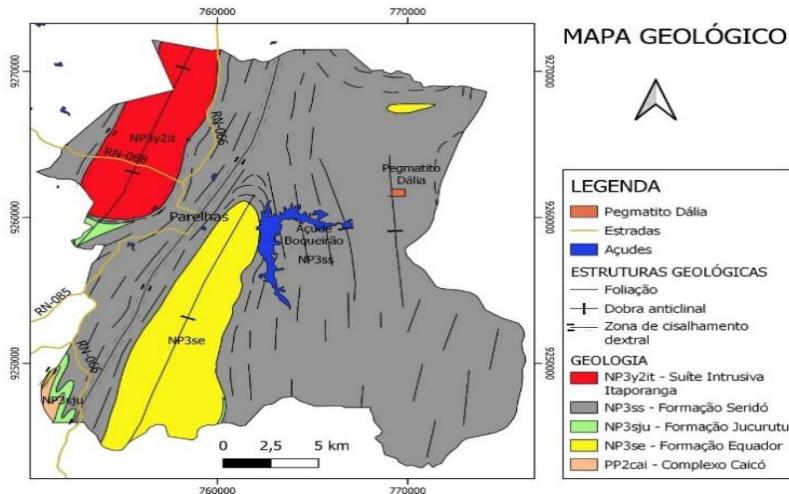
ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL DA JAZIDA

A área de estudo deste trabalho, uma pedreira localizada no Sítio Mufumbo, município de Parelhas/RN, no Seridó potiguar, insere-se no contexto geotectônico do Cinturão Seridó, parte da Província Pegmatítica da Borborema (PPB). Geologicamente, a jazida caracteriza-se pela ocorrência de xistos que servem como rochas encaixantes para corpos intrusivos de pegmatitos graníticos.

Sua relevância para o estudo reside na composição mineralógica, que inclui minerais-fontes potenciais de nutrientes, como feldspato potássico e micas, importantes para o fornecimento de potássio (K), e potencialmente apatita, como fonte de fósforo (P) (Belotti, 2024; Grecco *et al.*, 2014).

A caracterização geológica e mineralógica detalhada desses materiais na jazida, conforme ilustrados na Figura 2, é fundamental para compreender seu potencial como insumo agrícola e a viabilidade de métodos de ativação mineral, como o tratamento térmico, tema central deste capítulo. A base cartográfica da área é fornecida pela Folha Jardim do Seridó (Sudene, 1972), complementada por estudos geológicos e mineralógicos mais recentes da região do Seridó e da PPB (De Medeiros *et al.*, 2012; Souza *et al.*, 2018).

Figura 2 - Mapa geológico simplificado do Rio Grande do Norte com destaque para o município de Parelhas, área onde está localizada a jazida estudada. O mapa ilustra as principais unidades litológicas e estruturas geológicas da região, inseridas no contexto do Cinturão Seridó. Escala 1:100.000



Fonte: Medeiros e Dantas (2015), atualizado de Angelim *et al.* (2006).

ANÁLISE MINERALÓGICA DAS ROCHAS

Para a caracterização mineralógica e química das amostras de pegmatito e xisto coletadas na área de estudo, foram empregadas as técnicas de Difração de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (FRX) e Análise Termogravimétrica (TG) acoplada à Análise Térmica Diferencial (ATD). A preparação das amostras para as análises de DRX e FRX seguiu um protocolo comum. Uma subamostra representativa de aproximadamente 150 g da fração < 35 mesh foi cominuída em moinho de discos pulverizador por 2 minutos para obtenção de pó fino (< 200 mesh). O material pulverizado foi homogeneizado e quarteado para geração de alíquotas representativas para análise e arquivo.

DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A técnica de DRX foi utilizada para a identificação e determinação da composição mineralógica das amostras. O método baseia-se na difração dos raios X pelos planos cristalinos dos minerais, gerando um padrão único (difratograma) para cada fase mineral (EPP, 2016).

As análises de DRX do pegmatito foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Rochas Ornamentais (NRES/CETEM) em Cachoeiro de Itapemirim-ES. Os difratogramas foram obtidos em um difratômetro Shimadzu XRD 7000, utilizando radiação CuK ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), com passo (2θ) de $0,02^\circ$ e faixa de varredura entre 5° e 80° (2θ).

Para as amostras de xisto, a análise foi executada no Laboratório de Tecnologia de Materiais da UFCG, em Campina Grande-PB, utilizando um equipamento Shimadzu XRD 6000. Os parâmetros de análise empregados foram: radiação Cu K (40 kV/30 mA), velocidade do goniômetro de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$ (2θ).

A interpretação dos difratogramas para identificação das fases minerais foi realizada por comparação com padrões cristalográficos contidos no banco de dados PDF 02 (ICCD, 2003).

FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

A composição química elementar das amostras foi determinada por FRX, técnica que permite detectar e quantificar a concentração de elementos químicos com base na emissão de fôtons característicos após excitação por raios X. A amostra para análise de FRX foi preparada sob a forma de pó fino, seguindo o mesmo protocolo descrito para a análise de DRX. Os resultados foram expressos como teor de óxidos (Ismail *et al.*, 2016).

A análise química do pegmatito foi conduzida no Laboratório de Caracterização de Rochas Ornamentais (NRES/CETEM), Cachoeiro de Itapemirim-ES, utilizando um instrumento portátil de FRX Thermo Scientific Niton XL3T. Esta abordagem fornece uma análise semiquantitativa para misturas complexas como rochas (Ismail *et al.*, 2016).

As amostras de xisto foram analisadas no Laboratório do Centro de Referência de Tecnologia Mineral do IFRN, em Currais Novos-RN. Utilizou-se um espectrômetro de bancada de Energia Dispersiva (EDX) da marca Thermo Fisher Scientific, Modelo ARL QUANT'X, operando com o método a ar.

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (ATG) E TÉRMICA DIFERENCIAL (DSC)

As análises TG e DSC foram realizadas para avaliar o comportamento térmico das amostras, incluindo perdas de massa (TG) e eventos térmicos como transições de fase ou reações (DSC). As análises foram executadas em um equipamento Shimadzu TA 60, no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO), Departamento de Farmácia do CCBS/UEPB. As amostras foram aquecidas a uma taxa de 12,5 °C/min, sob atmosfera de gás nitrogênio (N₂), até a temperatura máxima de 1.000 °C. Na análise de ATD, utilizou-se óxido de alumínio (Al₂O₃) calcinado como material de referência.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

COLETA DE ROCHAS NA REGIÃO DA PPB

O município de Parelhas, localizado no estado do Rio Grande do Norte, está inserido no contexto geológico da Província

Borborema, uma importante unidade tectônica do Nordeste brasileiro, conhecida por sua diversidade litológica e alto potencial mineral. A geologia local é marcada pela presença de unidades representativas, como o Complexo Serra dos Quintos (PPsq), a Formação Equador (NP3s/se) e a Suíte Itaporanga (NP3 2cm), esta última composta por rochas ígneas de afinidade cálcio-alcalina, com teores médios a elevados de potássio (Araújo *et al.*, 2025; Rezende Nascimento, Petta, Campos, 2014).

O recurso mineral estudado é uma rocha pegmatítica, caracterizada por sua ocorrência em forma de diques intrusivos que cortam unidade metamórficas, especialmente os micaxistas da Formação Seridó, os quais são predominantes na região, como mostrado na Figura 3 (Nascimento, Ferreira, 2010). Essas intrusões pegmatíticas representam os estágios finais de cristalização de magmas graníticos, ricos em voláteis e elementos incompatíveis, o que confere aos pegmatitos uma mineralogia diversificada e, muitas vezes, economicamente relevante (da trindade, sá, de freitas Macedo, 2008).

Do ponto de vista mineralógico, o pegmatito estudado apresenta uma composição típica, dominada por quartzo, feldspatos potássicos (principalmente microlina), além de micas (muscovita e biotita). Minerais acessórios como turmalina negra, granadas do tipo grossulária, hornblenda e apatita também estão presentes, conferindo ao conjunto uma mineralogia complexa e indicativa de condições especiais de formação. A coloração da rocha varia do branco ao cinza claro, aspecto comum nos pegmatitos de alto grau de diferenciação (Cesar-Mendes, 1995; DE Albuquerque *et al.*, 2020).

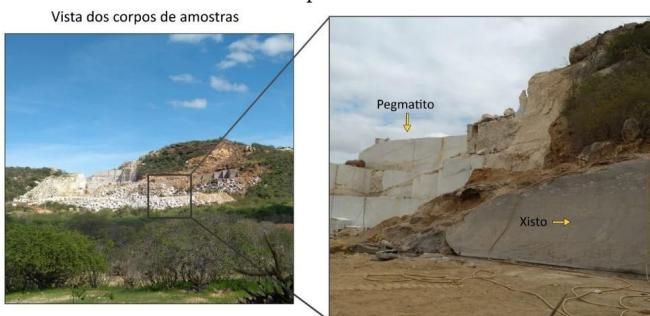
Intercaladas entre os quartzitos da Formação Equador e os micaxistas da Formação Seridó, são observadas lentes de rochas calcissilicáticas, com espessura métrica e coloração verde escura (Figura 3). Essas rochas exibem textura granular que varia de média a grossa e mineralogia típica, composta por actinolita, quartzo, entre outros, sugerindo condições de metamorfismo de médio a alto grau, com

possível influência de fluidos hidrotermais (Dantas, Lima, Pereira, 2020; Oliveira, Cunha, Mendes, 2013).

Do ponto de vista econômico, essas rochas são relevantes por apresentarem mineralizações secundárias de cobre e urânio, com ocorrência de minerais como malaquita e uraninita, além de registros esparsos de ouro, conforme descrito por Araújo (1998). Essas mineralizações estão frequentemente associadas à ação de fluidos pegmatíticos, que atuam como agentes de remobilização dos elementos presentes nas rochas hospedeiras. Durante esse processo, os elementos químicos são transportados por soluções hidrotermais e posteriormente precipitados em zonas de fraturas ou cavidades dentro dos corpos pegmatíticos, formando concentrações secundárias economicamente interessantes (Guimarães *et al.*, 2024; Neto, 2008;).

A presença de tais associações entre os pegmatitos e as rochas encaixantes evidencia a importância da interação entre os sistemas magnéticos tardios e as unidades metamórficas regionais. Essa interação pode tanto gerar mineralizações economicamente viáveis quanto modificar a geoquímica local, sendo um aspecto relevante para a compreensão do potencial das jazidas da PPB (DE Araújo Neto, DE Lira Santos, Santos, 2021; Gomes *et al.*, 2008; Soares *et al.*, 2018).

Figura 3 - Vista dos corpos de coleta das amostras com pegmatitos e xistos indicados por setas



Fonte: Própria (2024).

ANÁLISE MINERALÓGICA DAS ROCHAS

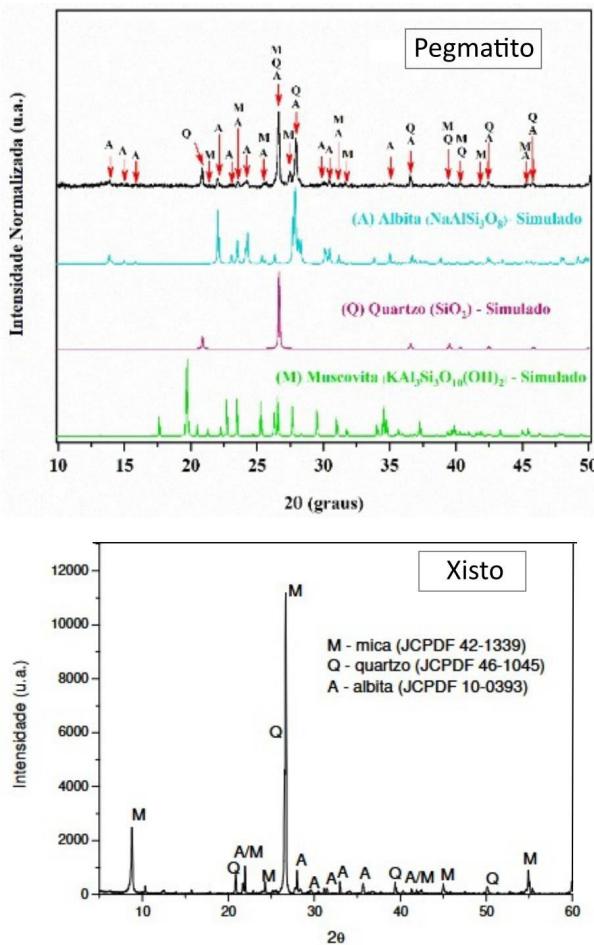
DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Com base na composição mineralógica observada nos difratogramas, apresentados na Figura 4, identificou-se a presença predominante de quartzo (SiO_2), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e micas (principalmente muscovita), corroborando a descrição petrográfica das amostras. Esses minerais foram identificados tanto na análise da amostra de pegmatito (Figura 4A) quanto na de xisto (Figura 4B), conforme os padrões de difração (JCPDF 46-1045 para quartzo, JCPDF 10-0393 para albita e JCPDF 42- 1339 para mica).

O quartzo, representado por picos intensos e bem definidos próximos a $20\text{--}26,6^\circ$, evidencia alta cristalinidade, comportamento igualmente observado para a albita e para as micas. A albita apresenta múltiplos picos característicos entre 20° e 40° , enquanto as micas exibem reflexões intensas nas baixas e médias faixas de 2θ . A nítida definição dos picos indica que os minerais estão bem cristalizados e pouco alterados (Belotti, 2024; Cobric *et al.*, 2011; Dantas *et al.*, 2024).

Considerando as propriedades térmicas desses minerais, sabe-se que o quartzo é estável até temperaturas muito elevadas (acima de $1000\text{ }^\circ\text{C}$), enquanto a albita e a muscovita suportam temperaturas de até aproximadamente $800\text{ -- }1100\text{ }^\circ\text{C}$ antes de apresentarem alterações estruturais mais significativas. Dessa forma, é esperado que tratamentos térmicos moderados, na faixa de até $600\text{ }^\circ\text{C}$, não comprometam drasticamente a estrutura cristalina desses materiais, mantendo a integridade mineralógica observada (Barbato *et al.*, 2010, Brígido *et al.*, 2024, Frizzo, 2019).

Figura 4 - Difratograma das amostras de pegmatito comparados aos padrões simulados de albita (A), quartzo (Q) e muscovita (M) (acima) e de xisto com os padrões de referência (abaixo).



Fonte: Própria (2024).

FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A análise química por FRX das amostras de pegmatito e xisto permitiu caracterizar a composição elementar principal de

cada litotipo (Tabela 1). O pegmatito apresenta um teor elevado de SiO_2 (71,50%) e Al_2O_3 (16,50%), seguido por teores significativos de álcalis, como K_2O (4,97%) e Na_2O (4,17%). Esses resultados são coerentes com a mineralogia identificada por DRX, dominada por quartzo, albita e muscovita (Figura 4). A baixa concentração de Fe_2O_3 (0,28%) também reflete a coloração clara observada macroscopicamente na rocha (Figura 1).

Em contraste, o xisto apresenta uma composição química mais heterogênea, com destaque para um teor expressivo de Fe_2O_3 (16,47%) e um SiO_2 consideravelmente menor (51,48%) em comparação ao pegmatito. O elevado conteúdo de ferro é compatível com a presença de minerais como actinolita, diopsídio e epídoto, sugerindo a predominância de fases maficas típicas de rochas calciosilicáticas (Hestnes; Sørensen, 2012). Além disso, a presença de elementos como TiO_2 (1,77%), P_2O_5 (0,33%) e traços de MnO , Co_3O_4 , BaO e SrO indicam a diversidade mineralógica dessas rochas e possíveis fontes para a remobilização de metais (como Cu e U) nos sistemas pegmatíticos (Lira *et al.*, 2016).

Tabela 1 - Composição química por fluorescência de raios-X (FRX) das amostras de pegmatito e xisto

| Óxidos % | Amostras | |
|-------------------------|-----------|-------|
| | Pegmatito | Xisto |
| SiO_2 | 71,50 | 51,48 |
| Al_2O_3 | 16,50 | 21,30 |
| Fe_2O_3 | 0,28 | 16,47 |
| K_2O | 4,97 | 4,75 |
| Na_2O | 4,17 | - |
| CaO | 0,89 | 2,87 |
| MgO | 0,89 | - |
| TiO_2 | - | 1,77 |
| P_2O_5 | - | 0,33 |

| Óxidos % | Amostras | |
|--------------------------------|-----------|-------|
| | Pegmatito | Xisto |
| MnO | - | 0,23 |
| Co ₃ O ₄ | - | 0,22 |
| BaO | - | 0,20 |
| Outros | 0,19 | 0,38 |

Fonte: CETEM, 2024.

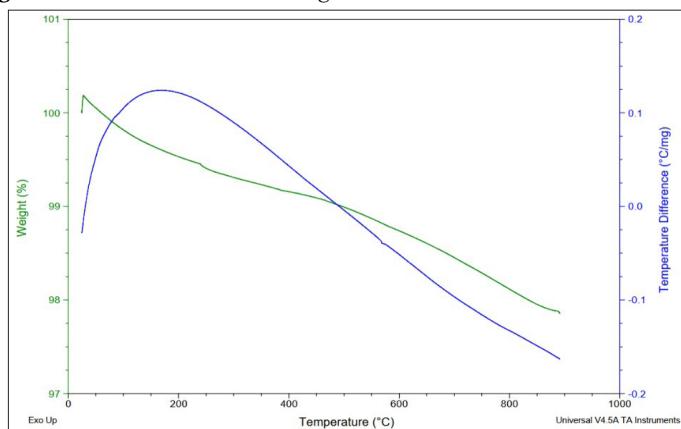
Esses resultados reforçam a interpretação mineralógica obtida anteriormente e indicam que, em potenciais aplicações, o pegmatito pode atuar como fonte de sílica e alumínio, enquanto o xisto, pela riqueza em ferro e outros óxidos, poderia ter diferentes utilizações industriais, como no enriquecimento de compostos metálicos ou formulações agrícolas específicas (Gomes, 2017; Novaes, 2025).

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Os perfis termogravimétricos das amostras complementam os dados mineralógicos e químicos ao revelar o comportamento térmico dos materiais. O xisto (Figura 5) apresentou maior reatividade térmica, com perda de massa gradativa ao longo do aquecimento e uma leve inflexão por volta de 200 °C a 600 °C, indicando a eliminação de água adsorvida e a possível desidroxilação de minerais lamelares, como micas e cloritas (Foltin, 2015; Silva, Carvalho, Rocha, 2018).

A curva DSC (Figura 5) associada exibe um pico endotérmico entre aproximadamente 100 °C e 250 °C, típico de processos de desidratação e reorganização estrutural em minerais filossilicatos. A progressiva redução da linha DSC após esse intervalo, até cerca de 850 °C pode estar relacionada à degradação de fases minerais contendo Fe ou Ti, além de transformações estruturais que não envolvem fusão evidente (Gonella, 2007; Lee, 2001).

Figura 5 - Curvas de análises termogravimétrica e térmica diferencia do xisto.



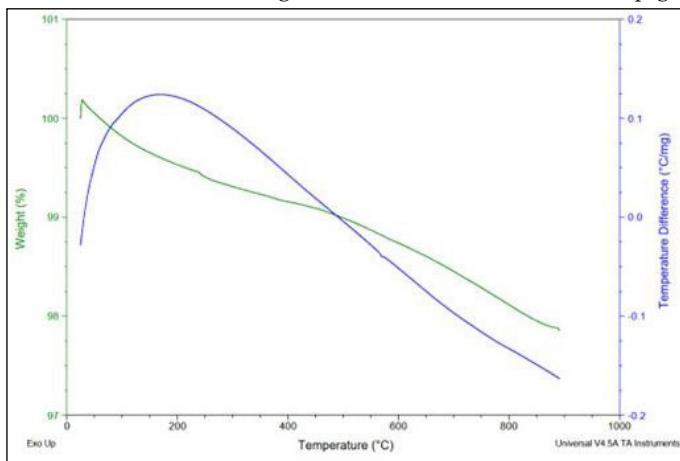
Fonte: CETEM, 2024.

Na Figura 6, é possível observar que o pegmatito, por sua vez, exibiu um comportamento termicamente mais estável, com perda de massa inferior a 1% até 900 °C, reflexo da predominância de minerais resistentes ao calor, como quartzo e albita (Novaes, 2025; Silva, Carvalho, Rocha, 2018).

A curva DSC (Figura 6) apresenta um pico endotérmico amplo entre 100 °C e 250 °C, associado principalmente à desidroxilação parcial da mica e à possível eliminação de água intergranular ou ligada a impurezas. A ausência de eventos térmicos acentuados ao longo da curva reflete a natureza estruturalmente mais estável do material. Apesar da menor reatividade térmica, a presença de K2O em proporção relevante (4,97%) sugere que o material ainda pode ser explorado como fonte de potássio, especialmente se submetido a temperaturas elevadas ou tratamentos que favoreçam sua liberação (Gonella, 2007).

Dessa forma, estes dados reforçam a viabilidade do uso do xisto como insumo agrícola ativável por calor, enquanto o pegmatito se destaca por sua estabilidade e potencial complementar na formulação de fertilizantes alternativos.

Figura 6 - Curvas de análise termogravimétrica e térmica diferencial do pegmatito



Fonte: CETEM, 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que os pegmatitos e xistos da Província Pegmatítica da Borborema apresentam características mineralógicas e químicas que os tornam potenciais fontes alternativas de nutrientes, em especial potássio e fósforo, para uso agrícola. A identificação de minerais como moscovita, illita, clorita, microclina, albita e quartzo por meio das análises de DRX e FRX reforça a relevância dessas rochas, cujos constituintes já são reconhecidos por seu papel na liberação gradual de nutrientes no solo.

As análises térmicas (TG/DSC) contribuíram para compreender o comportamento desses materiais frente ao tratamento térmico, evidenciando transformações estruturais associadas à desidratação de minerais hidratados e à decomposição de fases voláteis. Essas alterações facilitam a liberação dos elementos de interesse, como o potássio contido na moscovita e na microclina, e o fósforo associado a outros minerais presentes nos xistos. Assim, o tratamento térmico

se mostra uma etapa importante para viabilizar o uso agronômico dessas rochas.

Ao aliar os dados mineralógicos, químicos e térmicos, é possível inferir que esses materiais possuem potencial para compor insumos agrícolas alternativos, especialmente em regiões onde o acesso a fertilizantes convencionais é limitado. A valorização de recursos locais, como os estudados neste trabalho, pode contribuir para a redução de custos na produção agrícola, além de promover uma abordagem mais sustentável e integrada à realidade regional.

Portanto, este estudo reforça a importância de investigar e caracterizar recursos minerais não convencionais com vistas ao seu aproveitamento agronômico. Estudos complementares, como ensaios agronômicos e avaliações de solubilidade dos nutrientes após o tratamento térmico, são recomendados para consolidar o uso desses materiais como insumos agrícolas viáveis e ambientalmente responsáveis.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, que ofereceu infraestrutura e apoio, bem como, à agência financiadora Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro da Chamada CNPq/CT- Mineral/CT-Energ nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais Estratégicos.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, I. M. B.; BARRETO, S. B.; SANTOS, G. L.; ARAÚJO NETO, J. F.; GUIMARÃES, I. P. A mineralogia acessória do Amazonita Pegmatito Serra Branca: classificação de um pegmatito NYF na Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 20, n. 3, p. 47-61, 2020.

ARAÚJO NETO, J. F.; SANTOS, L. C. M. L.; SANTOS, G. L. Geologia e aspectos genéticos de depósitos de esmeralda em zonas de cisalhamento: um olhar sobre os depósitos esmeraldíferos da Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 21, n. 2, p. 19-39, 2021.

ARAÚJO, M. N. C. Arcabouço litoestrutural da porção leste de Carnaúba dos Dantas/Parelhas, RN. Monografia (Graduação em Geologia), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1998.

ARAUJO, F. S. **Bioitemperismo microbiano de rejeitos de xisto: potencial de fertilização de solos e sustentabilidade no Semiárido**. Trabalho de conclusão de curso em Agroecologia, UEPB, CCAA, 14 f., 2024.

ARAÚJO, A. M. M.; SANTOS, L. L.; PAIVA, W.; OLIVEIRA, F. M. C.; SOARES, D. R.; SOUSA, A. A. P.; DOS SANTOS FILHO, J. I. Caracterização tecnológica e mineralógica do Pegmatóide 'Dália' para aplicações ornamentais. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 22, 2025.

ANGELIM, L. A. A.; MEDEIROS, V. C.; NESI, J. R. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM/FAPERN, 2006. 1mapa color., 130 cm x 91 cm. Escala. 1:500.000.

AQUINO, A. R. L.; ALMEIDA, F. A.; LIMA, L. C. C.; ROCHA, J. D. L.; RODRIGUES, J. G. L. Nutrient release from alkaline rocks from the Fortaleza volcanic province as a natural fertilizer. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2020.

BARBATO, C. N.; SAMPAIO, J. A.; Luz, A. B. D.; OGASAWARA, T. Produção da vitrocerâmica feldspática reforçada com leucita utilizando os feldspatos contidos no pegmatito da Região Borborema-Seridó. **CETEM/UFPE**, 2010.

BELOTTI, F. M. Caracterização mineralógica de rejeito de pegmatito e seu potencial para rochagem. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e4283-e4283, 2024.

BRASIL. Lei nº 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 provi-
dências. **Brasília**, 2013.

BRÍGIDO, C. R. S.; NEUMANN, R.; BRAGA, P. F. A. **Caracterização mineralógica, química e tecnológica do concentrado de espodumênio**, p. 315-325. In: 23º Seminário de Mineração, São Paulo, Brasil, 2024.

BRITO, R. S. *et al.* Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 6, n. 1, 2019.

BOSSI, E. T.; VILLAR, L. F. S. Caracterização química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro de diferentes percentagens de finos. **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**, p. 196, 2020.

COBIC, A. *et al.* Crystal morphology and xrd peculiarities of brazilianite from different localities. **Natura Croatica**, v. 20, n. 1, p. 1, 2011.

DANTAS, E. P.; LIMA, M. A. B.; PEREIRA, L. B. F. **Rochas ornamentais do estado do Rio Grande do Norte: mapa de potencialidades**. Natal: CPRM, 2020.

DANTAS, L. F. *et al.* **Identificação e caracterização dos pegmatitos litiníferos na região do Seridó, entre os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte**. Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

EPP J. X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characteri-
zation. In: Hübschen G, Altpeter I, Tschuncky R, Herrmann HG.
Materials characterization using Nondestructive Evaluation (NDE)
Methods. USA: Elsevier; 2016. p. 81- 124. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00004-3>.

FRIZZO, R. G. **Piroplasticidade em cerâmica de composição albita-feldspato potássico-caulim**. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2019.

FOLTIN, J. P. *et al.* ESTUDO DA CINÉTICA DE PIRÓLISE DE XISTO. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 10456-10464, 2015.

GRECCO, M. F.; BAMBERG, A. L.; BERGAMNN, M.; SANDER, A.; SILVEIRA, C. A. P.; MARTINAZZO, R.; LOUZADA, R. Liberação de nutrientes das frações minerais mesocrática e leucocráticas granitoides da pedreira silveira-Pelotas/RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 47., 2014, Salvador, BA. Trilhando as novas fronteiras dos recursos naturais: anais. Salvador: **Sociedade Brasileira de Geologia**, 2014.

GOMES, C. L., MARQUES, J., DIAS, P. S. A., & COSTA, J. C. **Análise descritiva das unidades portadoras de mineralização tantalífera em pegmatitos do sul da província zambeziana (MOÇAMBIQUE)**, 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, p 1-23, 2008.

GOMES, A. A. A. **Prospeção Geofísica e Caracterização de Pegmatitos da Região de Ferreira de Aves-Sátão**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Aveiro (Portugal), 2017.

GONELLA, L. B. **Nanocompósitos de poliamida 6 com montmorilonitas e xisto**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre, 2007.

GUIMARÃES, A. N. D. A., SOUZA, S. R. C. D., SOUZA NETO, J. A. D., & NORONHA, D. D. D. Estudo de uma ocorrência cuprífera associada a pegmatito e skarn na região do "Domo da Coruja", Parelhas/RN. **Estudios Geologicos** - Madrid, v. 34, n. 2, p. 1- 26, 2024.

HESTNES, K. H.; SØRENSEN, B. E. Evaluation of quantitative X-ray diffraction for possible use in the quality control of granitic pegmatite in mineral production. **Minerals Engineering**, v. 39, p. 239-247, 2012.

ISMAIL S., HASHIM S. F. S., HUSSIN H., ABDULLAH N. S. Leached Residue Characterization of Manganese-Bamboo Saw Dust Blend: An X-Ray Diffraction **Study**. **Periodico di Mineralogia**. v. 85, p. 277, 2016.

LEE, L. M. **Determinação do calor específico do xisto da Formação Irati e do xisto de New Brunswick, usando o calorímetro de varredura diferencial DSC-50**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2001.

LIRA, B. B.; RODRIGUES, G.; CAVALCANTI FILHO, L. L.; MADEIRA, V. S.; COMBOIM, J. E. D. L. Estudo dos Pegmatitos da Província da Borborema-Paraíba: minerais e minérios de interesse tecnológico. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 13, n. 1, p. 113-119, 2016.

MEDEIROS, V. C.; DANTAS, E. P. (Org.) . Geologia e recursos minerais da Folha Currais Novos, estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. 1. ed. Recife: CPRM, 2015. v. 1. 154p

CESAR-MENDES, Júlio. **Mineralogia e gênese dos pegmatitos turmaliníferos da Mina do Cruzeiro, São José da Safira, Minas Gerais**. 1995. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MUNIZ, M. R.; ALCOVER NETO, A. **Comparação da determinação de perda ao fogo por analisador termogravimétrico e forno-mufla**. Em: XIII Jornada do Programa de Capacitação Institucional (PCI/CETEM), 2024.

NASCIMENTO, M. A. L.; FERREIRA, R. V. **Geoparque Seridó, RN**. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2010.

NASCIMENTO, P. S. R.; PETTA, R. A.; CAMPOS, T. Mapeamento temático da província pegmatítica borborema no estado do Rio Grande do Norte: municípios de Parelhas e Equador (THEMATIC MAPPING BORBOREMA PEGMATITE PROVINCE IN THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE: MUNICIPALITIES OF PARELHAS AND EQUADOR). **Revista GeoNordeste**, n. 3, p. 57-72, 2014.

NETO, M. T. O. C. A faixa cuprífera do Rio Grande do Norte e Paraíba e as relações de contato entre as formações Equador e Seridó. **Holos**, v. 3, p. 105-118, 2008.

NOVAES, R. C. *et al.* Caracterização química, mineralógica e espectral em pegmatitos litiníferos de Araçuaí-MG e aplicação em prospecção mineral por sensoriamento remoto. 2025.

NUNES J. A. *et al.* Geração e caracterização de rejeitos de rochas ornamentais na província pegmatítica da Borborema. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 2, p. 319-327, 2018.

OLIVEIRA, S. F.; CUNHA, A. L. C.; MENDES, V. A. Contexto geológico e estrutural da formação Seridó, nas pedreiras do “preto matriz”, município de Currais Novos/RN – Província Borborema. **Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente**, v. 3, n. 1, p. 32-40, 2013.

SANTOS, E. G. dos; SILVA, C. A.; NOVAIS, R. F.; MARTINS, E. S.; PAIVA, P. R. P. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 3, p. 409-419, 2016.

SILVA, R. R.; CARVALHO, I. S. B.; ROCHA, S. D.F. Transformações químicas e mineralógicas em mistura de rocha potássica e calcário submetida a processo térmico visando à liberação do potássio contido. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 4, p. 369, 2018.

SOARES, D. R., BEURLEN, H., DA SILVA, M. R. R., DA SILVEIRA GONZAGA, F. D. A., DOS SANTOS FILHO, J. I., & DE OLIVEIRA, H. B. L. Variedades gemológicas de minerais da Província Pegmatítica da Borborema, NE do Brasil: uma síntese. **Estudos Geológicos**, v. 28, n. 1, p. 56-71, 2018.

SOUZA, Z. S., SOUZA, L. C., VILALVA, F. C. J., CRUZ, L. B., RIBEIRO, C. V. A., OLIVEIRA, A. L. S., ... & ARAÚJO, J. B. P. Magmatismo peraluminoso sintectônico à deformação tangencial em Jardim do Seridó/RN, NE do Brasil. Em: **Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 49, 2018.

TRINDADE, I. R.; SÁ, J. M.; MACEDO, M. H. F. Comportamento de elementos químicos em rochas mineralizadas em ouro na Faixa Seridó, Província Borborema. **Brazilian Journal of Geology**, v. 38, n. 2, p. 303-318, 2008.

CAPÍTULO 12

SOLUBILIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA PARA LIBERAÇÃO DE K E P DE XISTOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Franklin Sales de Araújo¹

Élida Barbosa Corrêa²

Rodrigo Santana Macedo³

Vitória Sabrinna Azevedo Soares da Silva⁴

Josely Dantas Fernandes⁵

Cristiano dos Santos Sousa⁶

Antonio Augusto Pereira de Sousa⁷

1 Graduação em Agroecologia. Universidade Estadual da Paraíba, UEPB/ Campus II. franklin.araujo@aluno.uepb.edu.br;

2 Doutora em Proteção de Plantas pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agronômicas. UNESP. Professora do Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB/ Campus II. elida@servidor.uepb.edu.br;

3 Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela ESALQ/USP - SP, Professor da Unidade Acadêmica de Ciências Agrárias, UFCG – PB. rodrigo.santana@professor.ufcg.edu.br;

4 Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba – PB.vitoria.silva@aluno.uepb.edu.br;

5 Doutor em Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande. Técnico em Agropecuária da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB-Campus II. joselysolo@yahoo.com.br;

6 Mestre em Ciências do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA CAMPUS II, UFPB. cristianosousa@servidor.uepb.edu.br;

7 Doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Professor do Departamento de Química- DQ/CCT/UEPB. antonioaugusto@servidor.uepb.edu.br.

INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira enfrenta desafios significativos quanto à disponibilidade de macronutrientes essenciais, especialmente potássio (K) e fósforo (P). Considerando a elevada dependência de importação desses nutrientes, torna-se estratégico o uso de fontes minerais nacionais. Nesse contexto, a aplicação de rochas e minerais na agricultura surge como alternativa promissora para o aumento da produtividade das culturas e melhoria da qualidade do solo (Oladele *et al.*, 2024).

Rochas são fontes potenciais de nutrientes essenciais para as plantas, incluindo K e P. O potássio é essencial para a fotossíntese, transporte de água e nutrientes, enquanto o fósforo é vital para a formação de DNA, RNA e ATP, além de ser fundamental para a fotossíntese e respiração das plantas (Vance *et al.*, 2003; Marschner, 2012).

Nesse cenário, merece destaque a Província Pegmatítica da Borborema (PPB), constituída por xistos que contêm uma variedade de minerais, incluindo feldspatos e micas, reconhecidos por sua capacidade em fornecer K e P (Beurlen *et al.*, 2008). Estudos realizados na região têm mostrado que esses minerais podem ser usados para melhorar a fertilidade do solo e, consequentemente, aumentar a produtividade agrícola (Beurlen *et al.*, 2008).

Apesar da reconhecida importância mineral e econômica da PPB, essa região enfrenta desafios ambientais relacionados à geração de rejeitos de mineração, uma vez que os resíduos gerados representam um preocupante e crescente passivo ambiental. Nesse sentido, surge a possibilidade de beneficiamento desse rejeito, principalmente para o setor agrícola, reforçando o setor da bioeconomia na região (Nunes *et al.*, 2018). O aproveitamento de K e P dessas fontes sustentáveis também pode contribuir para reduzir a demanda de importação de fertilizantes, o que constitui atualmente em um dos maiores desafios da agricultura brasileira.

Um desafio ao aproveitamento agrícola desses materiais consiste na baixa solubilidade das rochas, o que dificulta a liberação de K e P em quantidades ideais às necessidades nutricionais das plantas. Nesse contexto, a solubilização biológica (biointemperismo) surge como promissora alternativa para fertilização agrícola sustentável, uma vez que a ação de microrganismos, como bactérias e fungos, pode promover o intemperismo dos minerais intemperizáveis, facilitando a liberação de nutrientes para as culturas (Harris, 2008).

Pesquisas demonstram que microrganismos como o fungo *Aspergillus niger* e a bactéria *Bacillus subtilis* têm a capacidade de solubilizar potássio e fósforo a partir de rochas de baixa solubilidade, como o xisto, tornando esses nutrientes mais disponíveis às plantas (Stille *et al.*, 2013). Coinoculação de *Paenibacillus polymyxa*, *Paenibacillus polymyxa* e *Cromobacterium violaceum* aumentaram significativamente a liberação de K e P das rochas apatita e biotita (Silva, V. N. *et al.*, 2017). Assim, a aplicação do biointemperismo na PPB pode representar não apenas uma estratégia para a recuperação de nutrientes dos rejeitos minerais, mas também uma abordagem sustentável para a gestão agrícola.

O objetivo desse estudo foi avaliar o potencial do biointemperismo para melhorar a disponibilidade de K e P de rejeitos minerais na PPB por meio da ação solubilizadora de *Aspergillus* sp., e *Pseudomonas* sp.

METODOLOGIA

LOCAL E COLETA DAS AMOSTRAS

O experimento foi realizado no Laboratório de Fitopatologia da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campus II, em Lagoa Seca-PB. As amostras de xisto foram coletadas em lavras de pegmatitos situadas no município de Parelhas, no estado do Rio Grande

do Norte. As amostras foram peneiradas em malha de 300 µm para uniformização do tamanho das partículas.

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização mineralógica do xisto foi realizada por difratometria de raios- X (DRX). Para tanto, as amostras foram montadas em lâminas em pó e analisadas no intervalo angular (2θ) de 3 - 70°. A identificação dos minerais foi realizada pelo programa EVA do D-2 Phaser.

MICRORGANISMOS UTILIZADOS E CULTIVO

Para avaliação do biointemperismo, foram utilizados fungo do gênero *Aspergillus* sp., e bactéria do gênero *Pseudomonas* sp., pertencentes à coleção de microrganismos do Laboratório de Fitopatologia localizado no Campus II/UEPB.

Aspergillus sp foi cultivado em meio de cultura Ágar Batata Dextrose (BDA) e a cultura foi incubada por sete dias a 30°C. Água destilada esterilizada foi usada para cobrir a placa e permitir a multiplicação dos esporos. Em seguida, a coleta dos esporos foi feita através de raspagem e a suspensão de esporos foi calibrada para a concentração de 1 x 10⁷ conídios mL⁻¹.

Pseudomonas sp foi cultivada em meio de cultura Ágar Nutriente (NA) contido em placas de Petri por 48 horas a 30°C. Para a obtenção das células bacterianas, utilizou-se solução salina estéril (0,85% NaCl) em volume suficiente para cobrir a superfície da placa. As colônias bacterianas foram raspadas cuidadosamente do meio de cultura e a suspensão bacteriana foi obtida para utilização. A calibração da suspensão bacteriana foi realizada utilizando espectrofotômetro ajustado para leitura a 600 nm. A suspensão bacteriana foi ajustada na concentração de 1 x 10⁷ ufc mL⁻¹

AVALIAÇÃO DA SOLUBILIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DE XISTOS

A avaliação da solubilização microbiológica de K, P e Na de xistos foi realizada por meio da adição de *Pseudomonas* sp., e *Aspergillus* sp., separadamente ou em conjunto, aos frascos de erlenmeyer (capacidade para 250 mL) contendo 50 mL de meio de cultura NBRIP e 5 g de xisto. O meio de cultura NBRIP foi composto por 10 g L⁻¹ de glicose, 0,15 g L⁻¹ de (NH4)2 SO4, 0,2 g L⁻¹ de KCl, 5 g L⁻¹ de MgCl2.6H2O e 0,25 g L⁻¹ de MgSO4.7H2O (Nautiyal, 1999). Após a adição do meio de cultura e do xisto aos frascos, o material foi autoclavado a 120 °C por 20 min. Após o resfriamento, 1 mL das suspensões (xisto + meio de cultura) contendo os microrganismos foi adicionado, separadamente ou em conjunto (*Pseudomonas* sp. + *Aspergillus* sp.), a mistura meio de cultura + xisto nas concentrações de 1 x 10⁷ conídios mL⁻¹ para *Aspergillus* sp., e de 1 x 10⁷ ufc mL⁻¹ para *Pseudomonas* sp.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Cinco tratamentos foram avaliados em cinco repetições, sendo os seguintes: (i) xisto + água (controle com aplicação apenas de água); (ii) xisto + meio de cultura (meio de cultura sem inoculação microbiana); (iii) xisto + meio de cultura + *Pseudomonas* sp. (meio de cultura inoculado com a bactéria); (iv) xisto + meio de cultura + *Aspergillus* sp. (meio de cultura inoculado com o fungo) e; (v) xisto + meio de cultura + *Pseudomonas* sp. + *Aspergillus* sp (meio de cultura inoculado com a bactéria e com o fungo). Após 10 dias de incubação em agitação constante a 120 rpm, foi analisada a disponibilidade dos nutrientes.

ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES

A disponibilidade de potássio (K⁺), sódio (Na⁺) e fósforo (P) foi avaliada utilizando a solução ácida de Mehlich 1 como extrator.

As quantificações de K^+ e Na^+ foram realizadas por fotometria de chama, enquanto a concentração de P foi determinada por colorimetria (Teixeira *et al.*, 2017).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com o teste F, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, considerando um nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MINERALOGIA

A análise mineralógica das amostras de xisto revelou a presença de quartzo (d (nm) = 0,423; 0,181; 0,154), mica (d (nm) = 1,00; 0,336), ortoclásio (d (nm) = 0,402; 0,372; 0,296) e plagioclásio (d (nm) = 0,367; 0,291) (Tabela 1). Essa mineralogia é semelhante à observada em outras regiões pegmatíticas do Brasil, tais como Amazonas, Minas Gerais e Rio Grande do Norte (Soares, 2004; Assumpção, 2015; Paludo *et al.*, 2018).

Tabela 1 - Mineralogia de xistos da Província Pegmatítica da Borborema

| Rocha | Mineral | d (nm) |
|-------|--------------|---------------------|
| Xisto | Quartzo | 0,423; 0,181; 0,154 |
| | Mica | 1,00; 0,336 |
| | Ortoclásio | 0,402; 0,372; 0,296 |
| | Plagioclásio | 0,367; 0,291 |

Fonte: Os autores.

A ocorrência de plagioclásio indica que o xisto contém minerais com maior facilidade para liberar potássio, o que indica viabilidade de aplicação agrícola desse material. Contudo, a baixa presença de minerais fosfáticos indica que esses xistos apresentam pouca quantidade de minerais fosfáticos, o que pode indicar baixa potencialidade para liberação de P.

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO (P)

Os resultados da solubilização de fósforo por meio de diferentes tratamentos microbiológicos são apresentados na Tabela 2. As análises indicaram que não houve diferença significativa entre os tratamentos com *Aspergillus* sp e *Pseudomonas* sp. em relação à solubilização de P ($p > 0,05$), sugerindo que esses microrganismos têm capacidade limitada de liberar P dos xistos. Uma vez que o gênero *Aspergillus* tem reconhecida capacidade de solubilizar P inorgânico (Xu *et al.*, 2024), os resultados do presente estudo podem ser atribuídos à ausência de minerais ricos em P nas amostras.

Estudos comparativos com outras rochas ricas em fósforo, como as avaliadas por Silva, A. R. *et al.* (2017), revelaram maior liberação de P em períodos de incubação mais longos e em rochas contendo até 12% de fósforo, o que destaca a especificidade mineralógica dos xistos da Borborema e sugere limitações em sua aplicação para fornecimento de P na agricultura.

DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO (K⁺)

Os resultados da solubilização de K por meio da atuação de *Aspergillus* sp e *Pseudomonas* sp são apresentados na Tabela 2. O tratamento controle (xisto + Água) apresentou o menor teor médio de potássio (23,68 mg L⁻¹). A ausência de meio de cultura e de

microrganismos mostra que a solubilização natural do K do xisto em água é baixa (Tabela 2).

O tratamento com meio de cultura, mas sem inoculação de microrganismos, resultou em uma média de 154,90 mg L⁻¹ de potássio, valor significativamente mais alto que o controle ($p < 0,05$). O potássio quantificado no tratamento com meio de cultura e xisto na ausência de microrganismos pode ser proveniente do meio de cultura, onde na sua composição tem 200 mg de KCl por litro.

A presença de microrganismos não aumentou a solubilização do K em comparação ao meio de cultura sem microrganismos ($p > 0,05$) (Tabela 2). No entanto, a liberação de K de materiais biotíticos ocorreu com a coinoculação de *Paenibacillus polymyxa*, *Paenibacillus polymyxa* e *Cromobacterium violaceum* em trabalho realizado por (Silva V. N. *et al.*, 2017). Esses resultados confirmam a natureza facilmente interperízavel da biotita, que permite maior liberação de K, ao contrário da muscovita presente no xisto avaliado, que possui K fortemente adsorvido à sua entrecamada. Resultados de liberação de K de biotitas e muscovitas em solos agrícolas confirmam essa assertiva (Pal *et al.*, 2001).

DISPONIBILIDADE DE SÓDIO (Na⁺)

O tratamento com *Pseudomonas* sp apresentou o maior teor de Na⁺, atingindo 601 mg kg⁻¹, significativamente superior aos demais tratamentos ($p < 0,05$) (Tabela 2). Bactérias solubilizadoras podem liberar Na de feldspato e aluminossilicato por

acidólise, quelação, reações de troca e complexação (Sattar *et al.*, 2019). Assim, os resultados sugerem que as bactérias utilizadas possuem potencial para solubilizar Na⁺, principalmente de plagioclásios. A ação das bactérias deve estar associada à liberação de exsudatos que aumentam a acidez do meio (acidólise), promovendo o intemperismo de plagioclásios.

O tratamento combinado com *Pseudomonas* sp e *Aspergillus* sp também mostrou um teor elevado de Na⁺ (450 mg kg⁻¹), embora inferior ao tratamento exclusivo com *Pseudomonas* sp. Esse comportamento pode ser explicado pela possível competição entre fungos e bactérias pelos nutrientes liberados ou pela absorção de Na⁺ por alguns microorganismos, resultando em um teor final intermediário de Na⁺ no tratamento misto.

A presença elevada de Na⁺ no solo apresenta implicações agro-nômicas e ambientais importantes. Em contato com carbonatos, o Na⁺ pode reduzir a acidez do solo, mas o acúmulo excessivo desse íon pode elevar a pressão osmótica do solo, gerando déficits hídricos nas plantas devido à competição osmótica. Além disso, o excesso de Na⁺ pode intensificar o processo de sodificação, onde o Na⁺ ocupa os sítios de troca de cátions, diminuindo a capacidade de retenção de nutrientes. Assim, o uso de xistos em sistemas agrícolas deve ser cuidadosamente controlado para evitar os riscos de salinização e suas consequências negativas para a saúde do solo e das plantas.

Tabela 2 - Teores de P, K⁺ e Na⁺ de xistos da Província Pegmatítica da Borborema submetidos a diferentes tratamentos de solubilização microbiológica

| Tratamentos | P (mg kg ⁻¹) | K (mg kg ⁻¹) | Na (mg kg ⁻¹) |
|---|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Xisto + água | 0,16 a* | 23 c | 54 c |
| Xisto + meio de cultura | 0,08 b | 154 a | 63 c |
| Xisto + meio de cultura + <i>Pseudomonas</i> sp. | 0,18 a | 116 b | 601 a |
| Xisto + meio de cultura + <i>Aspergillus</i> sp. | 0,21 a | 127 ab | 84 c |
| Xisto + meio de cultura + <i>Pseudomonas</i> sp. + <i>Aspergillus</i> sp. | 0,22 a | 141 ab | 450 b |

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Os autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização mineralógica das amostras de xisto evidenciou a presença de minerais como mica, ortoclásio e plagioclásio, que são fontes potenciais de potássio (K^+). Contudo, a baixa concentração de minerais ricos em fósforo (P) pode limitar o fornecimento eficaz de P a curto prazo.

A aplicação de *Aspergillus* sp e *Pseudomonas* sp não incrementou a solubilização de potássio de xistos da Província Pegmatítica da Borborema. Tal fato deve estar relacionado com a presença de K na entre camada da muscovita e na estrutura do tectossilicato ortoclásio.

O tratamento com *Pseudomonas* sp apresentou o maior teor de Na^+ , sugerindo que essas bactérias possuem potencial para solubilizar elemento do plagioclásio. Na prática, isso pode aumentar as limitações de solos sob condições semiáridas, especialmente em relação a salinidade e sodificação do solo, com implicações na absorção de água pelas plantas e a retenção de outros nutrientes essenciais. Assim, esses rejeitos em solos agrícolas devem ser cuidadosamente monitorados a fim de se evitar perdas de produção e problemas ambientais.

Futuras pesquisas devem explorar diferentes combinações de microrganismos ou ajustes no meio de cultivo, bem como avaliar outros tipos de rochas com maior teor de potássio, para aprimorar o processo de solubilização e viabilizar o uso de rejeitos como fonte agrícola de potássio.

O presente estudo contribui para a valorização dos rejeitos de mineração na Província Pegmatítica da Borborema, propondo uma abordagem que integra a sustentabilidade ambiental com o manejo agroecológico dos solos, pois a implementação de técnicas de biointemperismo microbiano poderá promover a fertilidade do solo, reduzir os impactos ambientais da mineração e gerar benefícios econômicos para a agricultura local. Em adição, pode reduzir os

custos de produção e aumentar o rendimento da produção agrícola, certamente contribuindo para o aumento da sobreaneria alimentar e redução da vulnerabilidade social e econômica da população local, destacando-se como uma estratégia viável para a sustentabilidade no Semiárido Brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio institucional da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), que fomentou bolsas de estudos, materiais e ambiente para projetos de pesquisa e extensão. Ao programa de Gestão Ambiental nas Empresas (PGAMEN) pelo incentivo ao nosso projeto, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro à Chamada CNPq/CT- Mineral/CT-Energ nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais Estratégicos e pela concessão de bolsas de estudos dos autores.

REFERÊNCIAS

ASSUMPÇÃO, J. P. **Estudo de caracterização de minerais de rochas ornamentais para aproveitamento sustentável**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BEURLEN, H.; DA SILVA, M. R. R.; THOMAS, R.; SOARES, D. R.; OLIVIER, P. Nb-Ta-(Ti-Sn) oxide mineral chemistry as tracer of rare-element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, Northeastern Brazil. **Mineralium Deposita**, 43, 207-228, 2008.

HARRIS, J. L. A ação dos micro-organismos na solubilização de minerais. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 1, p. 12-20, 2008.

ICDD – International Centre for Diffraction Data. **PDF-2 Database**. Versão 2003. Newtown Square: International Centre for Diffraction Data, 2003.

MARSCHNER, H. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants** (3rd ed.). Academic Press. 2012.

NAUTIYAL, C. S. A new method for selecting efficient phosphate solubilizing microorganisms. **Current Microbiology**, v. 39, n. 6, p. 317–320, 1999.

NUNES, J. A. *et al.* Geração e caracterização de rejeitos de rochas ornamentais na Província Pegmatítica da Borborema. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 2, p. 319-327, 2018.

OLADELE, S. O.; CURAQUEO, G.; AWODUN, M. A. Co-amendment of silicate dust and manure improves soil health metrics and crop yield in coarser-textured more than medium-textured soils. **Geoderma Regional**, v. 39, 2024.

PAL, D. K.; SRIVASTAVA, P.; DURGE, S.L.; BHATTACHARYYA, T. Role of weathering of fine-grained micas in potassium management of Indian soils. **Applied Clay Science**, v. 20, n. 1-2, p. 39-52, 2001.

PALUDO, F. *et al.* Análise mineralógica e ambiental de rejeitos de rochas na região da Borborema. **Journal of Environmental Management**, v. 214, p. 450-458, 2018.

SATTAR, A.; NAVEED, M.; ALI, M.; ZAHIR, Z. A.; NADEEM, S. M.; YASEEN, M.; MEENA, V. S.; FAROOQ, M.; SINGH, R.; RAHMAN, M.; MEENA, H. N. Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review. **Applied Soil Ecology**, v. 133, p. 146-159, 2019

SILVA, A. R. *et al.* Aplicação de rochas fosfáticas para aumento de disponibilidade de P em solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 7, p. 523-532, 2017.

SILVA, V. N. *et al.* Solubility curve of rock powder inoculated with microorganisms in the production of biofertilizers. **Agriculture and Natural Resources**, v. 51, p. 142-147, 2017.

SOARES, M. F. O aproveitamento de resíduos minerais como fonte de nutrientes para a agricultura no Brasil. **Revista de Ciência Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 412-419, 2004.

STILLE, P. *et al.* Microbial weathering and its application in agricultural fertilization. **European Journal of Soil Science**, v. 64, n. 5, p. 647-660, 2013.

TEIXEIRA, P. C.; *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, 157, 3, 423-447, 2003.

XU, K.; LV, X.; YUE, F.; ZHANG, L.; WANG, P.; AMOAH, I.D.; TANG, K. H. D.; YAO, Y.; LI, R. Effects of phosphate-solubilizing fungus *Aspergillus flavus* AF-LRH1 on promoting phosphorus solubilization, wheat growth and soil heavy metal remediation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 6, p. 114357, 2024.

CAPÍTULO 13

EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NA LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DE PEGMATITOS E XISTOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Rodrigo Santana Macedo¹

Jamile Bezerra Leite dos Santos²

Emanuel da Costa Cavalcante³

José Felix de Brito Neto⁴

Emily Vitória Gomes Moreira⁵

Franklin Sales de Araújo⁶

Cristiano dos Santos Sousa⁷

Antonio Augusto Pereira de Sousa⁸

-
- 1 Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela ESALQ/USP - SP, Professor da Unidade Acadêmica de Ciências Agrárias, UFCG – PB. rodrigo.santana@professor.ufcg.edu.br;
- 2 Graduanda em Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba – PB. jamile.leite@aluno.uepb.edu.br;
- 3 Mestre em Ciências do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA CAMPUS II, UFPB. emanuel.c@aluno.uepb.edu.br ;
- 4 Doutor em Agricultura pela Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho-Botucatu – UNESP. Professor no Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB/ Campus II. felix.brito@servidor.uepb.edu.br
- 5 Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba – PB. emilly.moreira@aluno.uepb.edu.br;
- 6 Graduação em Agroecologia. Universidade Estadual da Paraíba, UEPB. franklin.araujo@aluno.uepb.edu.br;
- 7 Mestre em Ciências do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA CAMPUS II, UFPB.cristianosousa@servidor.uepb.edu.br;
- 8 Doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Professor do Departamento de Química- DQ/CCT/UEPB. antonioaugusto@servidor.uepb.edu.br.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem aumentado o volume de pesquisas voltadas para a mitigação dos diferentes impactos ambientais relacionados às atividades agrícolas. Em específico, a utilização de fertilizantes constituídos por nitrogênio, potássio e fósforo, comumente conhecidos como NPK, tem despertado a atenção dessa comunidade dado os danos ambientais causados pela aplicação excessiva desses produtos (por exemplo, eutrofização de solos e águas, proliferação de algas em reservatórios). Assim, tem se intensificado o uso de rochas como fertilizantes minerais e/ou condicionantes da redução da acidez dos solos em vistas a atenuar os impactos ambientais e reduzir a dependência de importação brasileira de fertilizantes, principalmente os potássicos (Theodoro e Leonards, 2006).

Nesse contexto, destaca-se a utilização de rochas e/ou minerais disponíveis nas proximidades das áreas agrícolas. Essa prática, denominada rochagem, pode aumentar a produtividade agrícola e reduzir riscos ambientais a partir da adição de macro e micronutrientes às plantas, bem como melhorar a qualidade física, química e/ou atividade biológica dos solos (Swoboda *et al.*, 2022). Também assume

importância por atender às novas demandas de mercados mundiais relacionadas à sustentabilidade ambiental, por incorporar princípios da economia circular, no sentido de recuperar e reciclar subprodutos por meio da integração dos setores da mineração e agricultura e por representar uma estratégia tecnológica de baixo carbono.

Apesar do exposto, um dos entraves à utilização desses materiais e seus subprodutos está relacionado a sua baixa solubilidade. Nesse sentido, métodos que envolvem tratamentos térmicos apresentam-se como uma alternativa para romper as ligações químicas desses materiais, permitindo substituições isomórficas que podem

aumentar a liberação de potássio (K) da estrutura do mineral (Martins *et al.*, 2015).

Prévios estudos têm mostrado que a temperatura pode aumentar a solubilização de K de rochas, sendo considerada uma rota tecnicamente possível para o desenvolvimento de fertilizantes potásicos a partir de silicatos (Martins *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2018). Em adição, tratamento térmico associado à utilização de agentes fundentes, como cloreto de cálcio, também tem sido investigado para melhorar a solubilidade e a disponibilidade desses nutrientes (Silva *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2018).

Nesse sentido, entender o processo de alteração de minerais pode contribuir para neutralizar a acidez de solos ácidos e incrementar a fertilidade de solos distróficos (Manning, 2018). Apesar do exposto, ainda é desconhecido o efeito da calcinação na disponibilidade de K de rochas pegmatíticas, Província Pegmatítica da Borborema (PPB).

O objetivo desse capítulo é avaliar a liberação de K e fósforo (P) de pegmatitos e xistos da PPB por meio de diferentes ensaios de solubilização.

METODOLOGIA

LOCAL E SELEÇÃO DOS MATERIAIS

O estudo foi conduzido no Laboratório de Síntese e Análise de Materiais Avançados da Universidade Estadual da Paraíba, Campus I - Campina Grande-PB e Campus II – Lagoa Seca. Os pegmatitos e xistos utilizados são provenientes de lavras do município de Parelhas – RN. Os pegmatitos e xistos foram moídos e tamisados em peneira com malha de 0,3 mm (ABNT nº 50).

ENSAIOS DE SOLUBILIDADE

• Experimento 1

Amostras de solos arenosos, ácidos e distróficos (0-20 cm) foram coletadas no município da Baía da Traição – PB. Os solos foram secos e posteriormente peneirados em malha de 2 mm (Terra Fina Seca ao Ar). Parte desse solo foi autoclavado para inativar a ação dos microrganismos.

Os solos foram misturados com uma única dose de 5 t ha⁻¹ de pegmatito (PEG), constituindo os seguintes tratamentos: (i) T1: solo não autoclavado; (ii) T2: solo autoclavado; (iii) T3: solo autoclavado + PEG; (iv) T4: solo não autoclavado + PEG. Cada tratamento foi constituído por seis repetições, totalizando vinte e quatro unidades experimentais.

Após noventa dias de incubação, foi determinado o pH em água (1:2,5 – solo: H₂O) e os teores trocáveis de K e Na. Estes foram extraídos com solução ácida Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) e determinados por fotometria de chama (Teixeira *et al.*, 2017).

• Experimento 2

Amostras de pegmatitos foram submetidas a tratamento térmico a 800°C e 1100°C. A extração dos teores trocáveis de K dos pegmatitos in natura (25°C), a 800°C e 1100°C, foi realizada com solução ácida (Mehlich 1). A determinação do K⁺ foi realizada por fotometria de chama (Teixeira *et al.*, 2017).

A identificação mineralógica de cada uma das amostras foi realizada por meio de Difratometria de Raios X (DRX). Para isso, as amostras foram montadas em lâminas em pó e analisadas no intervalo angular (2θ) de 3 - 70°. A identificação dos minerais foi realizada pelo programa EVA do D-2 Phaser.

- **Experimento 3**

A disponibilidade de K e P foi avaliada em amostras de xistos (0,3 mm) utilizando $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ como fundente. Os ensaios foram realizados em triplicata, utilizando quatro proporções fundente/rocha (%): (T1): 0/100; (T2): 25/75; (T3): 50/50; (T4) 75/25. Aproximadamente 30g do material foram calcinados em mufla a três temperaturas (700°C, 900°C e 1100°C). O K trocável e o P disponível foram extraídos com solução ácida Mehlich 1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \ 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$), sendo posteriormente determinados por fotometria de chama. Os diferentes materiais foram submetidos a identificação mineralógica por DRX.

ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Posteriormente, foi empregado teste comparativo de médias por meio do Teste de Tukey a 1% de significância. As análises foram carreadas no software R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- **Experimento 1**

O pH e os teores trocáveis de K e Na são apresentados na Tabela 1.

Não foi observada diferença significativa entre os tratamentos para os teores trocáveis de K e Na, mostrando que a incubação desses solos distróficos com pegmatitos por um período de três meses não foi suficiente para a liberação desses cátions da estrutura de minerais micáceos e de feldspatos potássicos do pegmatito. Provavelmente tal fato é devido à presença de K na entrecamada de muscovitas e em ortoclásios e microclínios (dados não apresentados), que são minerais de menor susceptibilidade ao intemperismo. Resultados

semelhantes foram obtidos em outros estudos de solubilização de K de outras rochas do território nacional (Santos *et al.*, 2013; Martins *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2018).

Tabela 1 - Acidez trocável e teores trocáveis de K e Na de pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema submetidos a ensaios de solubilização a partir de mistura de solo

| Tratamentos | pH (H ₂ O) | K ⁺ | Na ⁺ |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------|
| | | ----- cmolc kg ⁻¹ ----- | |
| T1 | 5,01ns | 0,20ns | 0,00ns |
| T2 | 5,70 | 0,20ns | 0,01 [*] |
| T3 | 5,77 | 0,20ns | 0,01 [*] |
| T4 | 5,02 | 0,20ns | 0,00ns |

Fonte: Os autores.

A reação do solo passou de fortemente ácida em T1 e T4 (pH: 5,01-5,02) para moderadamente ácida em T2 e T3 (pH: 5,70-5,77). Esses resultados confirmam nenhum efeito significativo do pegmatito na redução da acidez do solo, indicando que o intemperismo de aluminossilicatos do pegmatito, ao qual acarretaria gradual consumo de íon H⁺, não foi um processo atuante durante o período de incubação. Ainda, a não ocorrência de ânions básicos nesses pegmatitos, tais como carbonatos (CO₃²⁻) e bicarbonatos (HCO₃⁻), inviabiliza a produção de íons OH⁻, o que também poderia contribuir para a redução da acidez do solo (Brady e Weil, 2013).

Por outro lado, a autoclavagem reduziu ligeiramente a acidez do solo. Um dos processos de acidificação dos solos é devido à produção de CO₂ que, ao entrar em contato com a água, forma ácido carbônico (H₂CO₃) que, por sua vez, dissocia para gerar ácido carbônico (HCO₃⁻) e íons H⁺ (Brady e Weil, 2013). Logo, nossos dados mostram que a autoclavagem reduziu o metabolismo das raízes e dos microrganismos do solo, reduzindo a produção de CO₂ e a consequente produção de íons H⁺.

• Experimento 2

A mineralogia principal dos pegmatitos estudados é apresentada na Tabela 2. Não foram observadas diferenças mineralógicas com o tratamento térmico. Os principais minerais identificados no pegmatito foram quartzo ($d = 0,423; 0,334; 0,181$ e $0,154$ nm), mica ($d = 1,00$ e $0,336$ nm), ortoclásio ($d = 0,402; 0,372$ e $0,296$ nm) e plagioclásio ($d = 0,367$ e $0,291$ nm). Essa mineralogia é semelhante aos reportados para pegmatitos do estado do Amazonas, Minas Gerais e Rio Grande Norte (Soares, 2004; Assumpção, 2015; Paludo *et al.*, 2018).

Tabela 2 - Identificação mineralógica de pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema in natura (25°C) e calcinadas a 400°C , 800°C e 1100°C

| Pegmatito | Mineral | d (nm) |
|--|--------------|-----------------------|
| | Quartzo | $0,423; 0,181; 0,154$ |
| $25^{\circ}\text{C}, 400^{\circ}\text{C}, 800^{\circ}\text{C} \text{ e}$ 1100°C | Mica | $1,00; 0,336$ |
| | Ortoclásio | $0,402; 0,372; 0,296$ |
| | Plagioclásio | $0,367; 0,291$ |

Fonte: Os autores.

Os resultados mostraram que os pegmatitos apresentam baixa solubilidade de K, com valores variando entre $1,2$ (25°C) a $0,1 \text{ cmolc kg}^{-1}$ (1100°C) (Tabela 3). Tal fato está relacionado com a baixa quantidade de K_2O nos pegmatitos, da ordem de 4-5% (dados não apresentados), bem como pela presença de K em minerais como feldspatos potássicos (microclínio) e muscovitas, as quais apresentam maior resistência ao intemperismo dada a cristalização em temperaturas próximas a 500°C .

Também foi observado que os teores trocáveis de K foram significativamente mais baixos ($p < 0,05$) nas amostras aquecidas, notadamente em 1100°C (Tabela 3). Resultados semelhantes foram obtidos no município de Minas Gerais/MG, onde a ineficácia do

tratamento térmico foi creditada à ausência de fundente (Santos *et al.*, 2013).

Tabela 3 - Teores trocáveis de K de pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema in natura (25°C) e calcinadas à 800°C e 1100°C

| Pegmatito | K+ (cmolc kg ⁻¹) |
|-----------|------------------------------|
| 25°C | 1,2a |
| 400°C | 0,3b |
| 800°C | 0,3b |
| 1100°C | 0,1c |

Fonte: Os autores.

Maior solubilização de K em amostras de verdete misturadas com calcário calcítico (25:75) submetidas à calcinação a 800°C foi creditada à solubilização de ortoclásio em decorrência da instabilidade das ligações Si-O-Si com o aumento da temperatura (Martins *et al.*, 2015). Maiores teores de K de verdetes também foram obtidos com aquecimento à 900°C na proporção cloreto de cálcio/verdete 2:1 com 60 min de reação (Santos *et al.*, 2013). Entretanto, esses autores encontraram redução nos teores de K de 900°C para 1100°C. À semelhança, o tratamento térmico sem aditivos não trouxe benefícios à solubilização de K de rochas potássicas (Pereira *et al.*, 2018). Nossos dados corroboram essas observações, apontando para a necessidade de emprego de um fundente para acelerar o processo de solubilização de K de minerais potássicos. Ainda, creditamos à formação de minerais potássicos de menor reatividade e/ou de fases vítreas a baixa solubilidade de K com o incremento da temperatura.

• Experimento 3

A mineralogia do xisto estudado é apresentada na Tabela 4. Os principais minerais identificados foram quartzo ($d = 0,423; 0,334; 0,181$ e $0,154$ nm), mica ($d = 1,00$ e $0,336$ nm) e albita ($d = 0,367$ e

0,291 nm). Essa mineralogia também foi reportada em outras rochas da PPB (Soares, 2004; Beurlen *et al.*, 2014; Campos *et al.*, 2019).

Tabela 4 - Identificação mineralógica de xisto da Província Pegmatítica da Borborema

| Material | Mineral | d (nm) |
|----------|---------|---------------------|
| | Quartzo | 0,423; 0,181; 0,154 |
| Xisto | Mica | 1,00; 0,336 |
| | Albita | 0,402; 0,372; 0,296 |

Fonte: Os autores.

Os teores de K⁺, Na⁺ e P dos xistos submetidos aos diferentes tratamentos e aquecidos a 700°C são apresentados na Tabela 5. Os teores de K⁺ não variaram significativamente entre os tratamentos ($p > 0,05$). Tal fato é devido ao elevado coeficiente de variação obtido que resultou da ampla variação nos teores de K⁺ ao longo dos tratamentos. Provavelmente, essa temperatura não foi suficiente para liberar K de minerais como feldspatos potássicos (microclínio) e muscovita, os quais apresentam maior resistência ao intemperismo dada a cristalização em temperaturas próximas a 500°C.

Tabela 5 - Teores de K⁺, Na⁺ e P de xistos da Província Pegmatítica da Borborema após aquecimento à 700°C

| Tratamento | K ⁺ | Na ⁺ | P |
|------------|---------------------------------|-----------------|------|
| | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | |
| T1 | 0,72ns | 0,90b | 365a |
| T2 | 1,51 | 2,53ab | 193b |
| T3 | 18,05 | 5,49a | 113c |
| T4 | 5,46 | 4,49a | 66c |

Fonte: Os autores.

Os teores de Na⁺ foram significativamente mais elevados com a aplicação de 50 e 75% de fundente (5,49 e 4,49 mg kg⁻¹, respectivamente; $p < 0,05$). Comportamento antagônico foi obtido para os

teores de P, que aumentaram significativamente sem a aplicação de fundente (T1: 365 mg kg⁻¹; p < 0,05). Tal fato indica que a solubilização de minerais facilmente intemperizáveis, notadamente a albita, é otimizada pela adição de CaCl₂ e aumento da temperatura. Apesar de não significativos, os maiores teores de K⁺ em T3 e T4 também apontam para a solubilização de feldspatos-K. Ao contrário, a adição de fundente seguida de aquecimento provavelmente permite a formação de fases minerais mais estáveis em relação à liberação de P, provavelmente relacionada à precipitação de formas de P-Ca. Após serem aquecidos a 900°C, os teores de K⁺, Na⁺ e P dos xistos submetidos aos diferentes tratamentos foram mensurados e são apresentados na Tabela 6. Diferentemente do aquecimento a 700°C, os teores de K⁺ são significativamente mais elevados quando são utilizados 25% e 50% de fundente. Resultados semelhantes foram obtidos em amostras de verdete misturadas com calcário submetidas à calcinação em 800°C e 900°C (Martins *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2013).

Tabela 6 -Teores de K⁺, Na⁺ e P de xistos da Província Pegmatítica da Borborema após aquecimento à 900°C

| Tratamento | K ⁺ | Na ⁺ | P |
|------------|---------------------|-----------------|------|
| | mg kg ⁻¹ | | |
| T1 | 0,2b | 0,6d | 336a |
| T2 | 53,9a | 39,5b | 195b |
| T3 | 47,7a | 56,0a | 0c |
| T4 | 6,9b | 16,2c | 4c |

Fonte: Os autores.

À semelhança do tratamento a 700°C, os teores de Na⁺ também aumentaram significativamente com a incorporação do fundente seguido de aquecimento 900°C (p < 0,05), sugerindo ruptura de minerais do grupo dos feldspatos. Os teores de P também foram significativamente maiores no tratamento sem e com 25% de fundente (p < 0,05).

Os teores de K⁺, Na⁺ e P dos xistos submetidos aos diferentes tratamentos e aquecidos a 1100°C são apresentados na Tabela 7. Os teores de K⁺ e Na⁺ são significativamente mais elevados quando utilizado 25% ou 50% do fundente, respectivamente ($p < 0,05$). Os teores de P são mais elevados sem a utilização do fundente ($p < 0,05$; T1: 336 mg kg⁻¹). Esse comportamento reitera a possibilidade de alteração de minerais facilmente intemperizáveis mais ricos em K e Na.

Tabela 7 - Teores de K⁺, Na⁺ e P de xistos da Província Pegmatítica da Borborema após aquecimento a 1100°C

| Tratamento | K ⁺ | Na ⁺ | P |
|---------------------------------|----------------|-----------------|------|
| ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | |
| T1 | 0,2b | 0,5c | 379a |
| T2 | 54,7a | 33,9ab | 151a |
| T3 | 53,7a | 55,7a | 21b |
| T4 | 13,3b | 22,6bc | 2b |

Fonte: Os autores.

CONCLUSÕES

Ensaios de incubação de pegmatitos com solos ácidos e distróficos não alteraram a acidez dos solos, tampouco a disponibilidade de K dos feldspatos. Por outro lado, o processo de autoclavagem do material reduziu ligeiramente a acidez dos solos. O tratamento térmico também não foi eficiente em aumentar a disponibilidade de K dos pegmatitos, ao passo que os xistos da PPB possuem potencial para liberar K às plantas quando submetidos a tratamentos térmicos, especialmente a 900°C e 1100°C, com destaque para os minerais biotita e plagioclásio. No entanto, a liberação de P não apresentou variações significativas com o tratamento térmico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio institucional da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), que fomentou bolsas de estudos, materiais e ambiente para projetos de pesquisa e extensão. Ao Programa de Gestão Ambiental nas Empresas (PGAMEN) pelo incentivo ao nosso projeto, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro à Chamada CNPq/CT- Mineral/CT-Energ nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de minerais estratégicos e pela concessão de bolsas de estudos dos autores.

REFERÊNCIAS

- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. Porto Alegre: Bookman Editora, 712p, 2013.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017, 574p.
- MANNING, D. A. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. **Nature Resources Research**, v. 27, p. 217-227, 2018.
- MARTINS, V.; GONÇALVES, A. S. F.; MARCHI, G.; GUILHERME, L. R. G.; MARTINS, E. S. Solubilização de potássio em misturas de verdete e calcário tratadas termoquimicamente. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 66-72, 2015.
- PEREIRA, A. C.; GOMES, M. R. S.; ROCHA, S. D. F. Eficácia do tratamento térmico na extração hidrometalúrgica de potássio em rochas contendo feldspato potássico. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 5, p. 1716-1727, 2018.
- SANTOS, W. O.; MATTIELLO, E. M.; COSTA, L. M. C.; DOS SANTOS, R. R.; GUIMARÃES, L. P. Solubilização de rocha glauconítica com tratamento térmico utilizando cloreto de cálcio como fundente. **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, p. 1-4, 2013.

SILVA, R. R.; CARVALHO, I. S. B.; ROCHA, S. D. F.

Transformações químicas e mineralógicas em mistura de rocha potássica e calcário submetida a processo térmico visando à liberação do potássio contido. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, p. 369-376, 2018.

SWOBODA, R.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders. A review. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150976, 2022.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78 n. 4, 2006.

VAN NOORT, R.; MØRKVED, P.; DUNDAS, S. Acid neutralization by mining waste dissolution under conditions relevant for agricultural applications. **Geosciences**, v. 8, p. 340-405, 2018.

CAPÍTULO 14

POTENCIAL AGRONÔMICO DE XISTOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Marconeide de Araújo Sobrinho¹

Rodrigo Santana Macedo²

Antonio Augusto Pereira de Sousa³

Maria Robeilsa dos santos Silva⁴

Franklin Sales de Araújo⁵

Emanuel da Costa Cavalcante⁶

Cristiano dos Santos Sousa⁷

Laercio Leal dos Santos⁸

-
- 1 Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia na Universidade Estadual da Paraíba – PPGCTA/UEPB. marconeide.araujo.sobrinho@aluno.uepb.edu.br;
 - 2 Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela ESALQ/USP – SP, Professor da Unidade Acadêmica de Ciências Agrárias, UCFG – PB. rodrigo.santana@professor.ufcg.edu.br;
 - 3 Doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Professor do Departamento de Química. Professor do Departamento de Química-DQ/CCT/UEPB. antonioaugusto@servidor.uepb.edu.br;
 - 4 Graduanda em Agroecologia. Universidade Estadual da Paraíba, UEPB. maria.robeilsa@aluno.uepb.edu.br;
 - 5 Graduação em Agroecologia. Universidade Estadual da Paraíba, UEPB. franklin.araujo@aluno.uepb.edu.br;
 - 6 Mestre em Ciência do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA, Campus II, UFPB. emanuel.c@aluno.uepb.edu.br;
 - 7 Mestre em Ciência do Solo pela Universidade Federal da Paraíba – CCA, Campus II, UFPB. cristianosousa@servidor.uepb.edu.br.
 - 8 Doutor em Engenharia Civil na área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Professor Doutor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba – DESA/UEPB. laercioleal@servidor.uepb.edu.br.

FERTILIZANTES E REMINERALIZADORES DE SOLOS

O Brasil tem se consolidado como um dos maiores produtores de alimentos do mundo em decorrência da crescente expansão dos setores relacionados ao agronegócio brasileiro. Essa ascensão perpassa pela elevada demanda por insumos, onde, em 2021, a agricultura nacional foi responsável pelo consumo de 45,8 milhões de toneladas de fertilizantes no país, que corresponde a cerca de 8% do consumo mundial; entretanto, 85% da demanda nacional foram supridos por importações (Anda, 2022). Além disso, os fertilizantes convencionais não apresentam todos os nutrientes essenciais à nutrição das plantas e são altamente solúveis, o que permite rápida perda de nutrientes por lixiviação.

O fato desses fertilizantes serem os insumos de maior custo no processo de produção agrícola, aliado ao seu baixo aproveitamento nos solos dado à adsorção em fases não disponíveis às plantas e/ou perdas por lixiviação e volatilização, tem contribuído para o desenvolvimento de inúmeras pesquisas que buscam avaliar o reaproveitamento de rochas e minerais para a produção e/ou aplicação como fertilizantes (Swoboda *et al.*, 2022).

Rochas e minerais são importantes na agricultura, pois têm a função de sustentar o crescimento das plantas, prover abrigo a populações de pequenos organismos e microrganismos, além de liberar nutrientes para as plantas, por meio da ação do intemperismo. Nesse conjunto de rochas e minerais, alguns têm importância significativa para a agricultura por conterem, em sua composição química, nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas como P, K, Ca, Mg e S, além de diversos oligoelementos. Entretanto, a eficiência na aplicação desses minerais está relacionada à disponibilidade desses nutrientes (van Straaten, 2007). Por isso, esses materiais podem aumentar a produtividade agrícola e reduzirem riscos ambientais a partir da adição de macro, micronutrientes e oligoelementos essenciais

às plantas, bem como melhorarem a qualidade física, química e/ou atividade biológica dos solos. Também assumem importância por atenderem às novas demandas de mercados mundiais relacionadas à sustentabilidade ambiental, por incorporarem princípios da economia circular e, por representarem uma estratégia tecnológica de baixo carbono. Esses materiais quando atendem critérios especificados em instruções normativas do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) podem ser registrados como remineralizadores (REM), o que pode diminuir os custos com importação de fertilizantes e a dependência internacional, diminuir o custo financeiro e ambiental com a produção de adubos solúveis e fortalecer cadeias produtivas locais minero- agrícolas.

Como visão de futuro para 2050, o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) preconiza que o Brasil irá avançar na produção e utilização de remineralizadores e/ou fontes alternativas de nutrientes, notadamente os potássicos e fosfatados, o que substancialmente trará benefícios produtivos e econômicos a partir da intensificação da economia circular e da bioeconomia. Essa última, por sua vez, pode efetivamente apoiar a redução da dependência de fertilizantes, no Brasil, a partir de soluções inovadoras e sustentáveis que utilizem técnicas e rotas biotecnológicas, efetivamente contribuindo para a diminuição do uso de fertilizantes não renováveis. Essas ações certamente contribuirão para integrar os setores da agricultura e mineração em um mesmo processo, visando desenvolvimento econômico, produção de alimentos e prestação de serviços ambientais e ecossistêmicos.

NORMATIZAÇÕES

Remineralizadores são definidos como “todo 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 de adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como, promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo" (Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013). Segundo as IN nº 5 do MAPA (BRASIL, 2016), os remineralizadores devem atender algumas especificações, a saber: i) soma de CaO, MgO e K₂O ≥ 9,0%; ii) teores de K₂O ≥ 1,0%; iii) teores de SiO₂ < 25%; e; iv) teores de As < 15 ppm; Cd < 10 ppm; Hg < 0,1 ppm e Pb < 200 ppm.

Para o registro do produto como remineralizador, deve ser elaborado relatório técnico-científico a partir de ensaios agronômicos demonstrando a atuação isolada ou cumulativa nas variáveis geoquímicas do solo e no crescimento e na produtividade da cultura. Ao final do processo, pretende-se obter o registro de materiais com reconhecido potencial agronômico junto ao MAPA, obtendo-se produtos alternativos que possam substituir parcial ou totalmente os onerosos insumos, atualmente, empregados como adubos ou condicionadores na agricultura da região Nordeste e, por conseguinte, reduzirem a dependência brasileira com importações.

Essas ações em ciência, tecnologia e inovação, em conjunto com outras ações agrogeológicas, atualmente, em andamento pelo SGB/CPRM (definição de zonas produtoras potenciais) e Agência Nacional de Mineração - ANM (regulamentação sobre pesquisa mineral), certamente intensificarão os esforços na direção do desenvolvimento e regulamentação de novos remineralizadores que sejam fontes competitivas de P e K para a agricultura nacional. Demais resultados, avanços e inovações esperadas são apresentados a seguir. Vale ressaltar que os produtos que não atendam a um ou mais parâmetros das normativas para registro junto ao MAPA serão considerados produtos novos, aos quais deve ser dado atendimento ao estabelecido no art. 15 do Decreto 4.954 de 2004.

Nesse sentido, experimentos para validações agronômicas em ambiente protegido e em condições de campo são desenvolvidos

para se obterem, ao final do processo, produtos a serem empregados como fontes alternativas de nutrientes. Essas ações seguramente contribuirão para desvendar rotas tecnológicas para produção de novos insumos para a região, o que representa uma alternativa tecnológica para o (i) fornecimento de nutrientes mais baratos e de melhor qualidade nutricional, reduzindo os custos de produção; (ii) retenção de água em solos submetidos a déficits hídricos severos, de suma importância para a região semiárida, onde as projeções sugerem um incremento na aridez, redução das chuvas, incremento da temperatura e déficits hídricos e períodos de seca mais longos até meados do século 21; (iii) sequestro de carbono e redução de gases de efeito estufa, com implicações diretas a regulação do clima regional e manutenção de serviços ecossistêmicos; (iii) recuperação de áreas degradadas, o que evitaria o desmatamento e a expansão de novas áreas; (iv) rejuvenescimento de solos distróficos com baixa reserva de nutrientes a partir da reconstrução da fertilidade dos solos; (v) reduzir a eutrofização de corpos hídricos pelo aumento do tempo de residência da matéria orgânica no solo e, por conseguinte, reduzindo a ação dos processos erosivos, e; (vi) reduzir o passivo ambiental, provendo benefícios sociais e ambientais às empresas de mineração (Theodoro e Leonards, 2006; Manning, 2018; van Noort *et al.*, 2018).

ENSAIOS AGRONÔMICOS

Dentre os inúmeros esforços para avaliar, o potencial econômico de rochas no território nacional, o Laboratório de Extensão, Tecnologia e Ensino de Química (LETEQ) da Universidade Federal da Paraíba (UEPB) vem desenvolvendo estudos de viabilidade agronômica de xistos, pegmatitos e gabros do município de Parelhas, estado do Rio Grande do Norte (Seridó Potiguar). Essa região está inserida em uma área rica em rochas pegmatíticas, conhecida como a

Província Pegmatítica da Borborema (PPB), que é caracterizada por suas grandes ocorrências de minerais raros e gema, sendo uma das maiores do mundo.

Numa primeira etapa foram realizadas análises mineralógicas e geoquímicas das rochas da PPB (Capítulo 13). Para estudos de viabilidade agronômica, o xisto e o gабro foram selecionados dada a ocorrência de minerais facilmente intemperizáveis com potencial para aportar Ca, Mg e K. Os ensaios são montados em delineamento experimental inteiramente casualizado consistindo em um esquema fatorial $2 \times 5 \times 2$, com quatro repetições.

Os fatores utilizados são dois tipos de solo (arenoso e argiloso), cinco doses (100%, 200%, 300%, 400% e 500%) e duas rochas (xisto e gабro) (Figura 1). Os níveis de K são estabelecidos para cultivar milho, conforme recomendações de Novais et.al 1991, a saber: 0 kg de $K_2O\ ha^{-1}$ (controle), 100% da dose recomendada, 200% da dose recomendada, 300% da dose recomendada, 400% da dose recomendada, 500% da dose recomendada. Cada unidade experimental consiste em aproximadamente 4 kg de solo (base seca) homogeneizados com as rochas e distribuídos de forma randômica em bancadas. Essas unidades permaneceram em período de incubação por 45 dias (Figura 1).

Após o período de incubação, o milho é semeado. Depois de alguns dias é realizado o desbaste das plantas deixando o mesmo número de plantas por vasos até o final do ciclo (sempre que possível) (Figura 2).

Os vasos são aleatorizados semanalmente para que as plantas tenham as mesmas condições de temperatura, sombreamento e incidência solar. Durante a condução do experimento, os solos são mantidos com umidade próxima a 80% da capacidade de campo, através de pesagens constantes dos vasos e reposição da umidade com água.

Figura 1 – Ensaio agronômico e amostras dos pós obtidos através das rochas da Província Pegmatítica da Borborema. A) pó de xisto; B) pó de gабro; C) solo argiloso (parte superior) e arenoso (parte inferior). D) Unidade experimental em período de incubação (solo + rocha)



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 2 - Ensaios agronômicos com rochas da Província Pegmatítica da Borborema



Fonte: Arquivo pessoal.

Passados 30 dias após a emergência das plantas, são coletadas amostras de solo e do tecido vegetal (parte aérea) e raiz. A parte aérea (PA) das plantas é cortada rente ao solo e acondicionada em sacos de papel que são pesados logo em seguida para obtenção da massa úmida da planta. Após esse processo, as amostras são submetidas à

secagem em estufa de circulação forçada, a 65°C, até massa constante. Em seguida, é realizada a pesagem e obtida a matéria seca da parte aérea (MSPA). A partir da MSPA e dos teores de N, P, K, Ca, Mg, Na e micronutrientes, são calculadas as quantidades exportadas destes nutrientes pelo cultivo, ou seja, o acúmulo de nutrientes na parte aérea.

As análises químicas dos solos são realizadas de acordo com Embrapa (2017). Os parâmetros analisados são: pH em água (1:2,5 - TFSA:H₂O); os teores trocáveis de Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, que são extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrometria de absorção atômica (Ca²⁺ e Mg²⁺) e titulometria (Al³⁺); P disponível, K⁺ e Na⁺, que são extraídos com solução Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) e determinados por fotometria de chama (K⁺ e Na⁺) e colorimetria (P); acidez potencial (H + Al), que é extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0 e determinada por titulometria; carbono orgânico total (COT) que é determinado por oxidação via úmida conforme método proposto por Yeomans e Bremner (1988).

No tecido vegetal, serão determinados os teores totais de N, P, K, Ca e Mg. A extração será realizada por via **úmida com digestão sulfúrica em bloco digestor**. O teor de N será determinado via **destilação** pelo método Kjeldahl e titulação com ácido sulfúrico 0,002 N. Os teores de Ca, Mg e os micronutrientes serão determinados por espectrometria de absorção atômica, os teores de K e Na por fotometria de chama e teor o P por espectrofotometria UV-Visível. Além de serem avaliadas as variáveis morfométricas como de altura de plantas, número de folhas, diâmetro de colmo, massa seca de raiz e parte aérea.

Figura 3 - Morfometria das plantas em ensaios agronômicos com rochas da Província Pegmatítica da Borborema



Fonte: Arquivo pessoal.

RESULTADOS

Nossos resultados parciais demonstram diferenças no crescimento das plantas em função do tipo de solo utilizados e rocha aplicada. De maneira geral, a altura das plantas de milho foi maior (25,0- 54,9 cm) no solo arenoso com aplicação de xisto (Solo 1 + Trat 2 + Rem 1) (Figura 4). No solo argiloso, as alturas variaram entre 17,0 e 39,2 cm, com maiores valores registrados no Trat 4 (com aplicação de xisto).

A quantidade de folhas também refletiu o padrão observado na altura das plantas. No solo arenoso, a maioria dos tratamentos resultou em 5 a 6 folhas, enquanto, no solo argiloso, os valores variaram entre 2 e 5 folhas. Em relação as rochas, o remineralizador 1 (xisto) apresentou melhor desempenho, promovendo maior crescimento tanto em altura quanto em número de folhas, em especial no solo arenoso. Esses resultados preliminares sugerem que o xisto pode disponibilizar maiores teores de nutrientes, o que está de acordo com

estudos que destacam o potencial agronômico de remineralizadores de rochas silicáticas (Theodoro; Leite, 2015; Silva *et al.*, 2020).

Figura 4 – Altura das plantas e quantidade de folhas sob diferentes tratamentos com remineralizadores em dois tipos de solo



Fonte: Autoria própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de ações voltadas para a avaliação das potencialidades das rochas busca uma alternativa sustentável para agricultura brasileira. A avaliação do potencial das rochas como

remineralizadores a partir de ensaios agronômicos busca traçar os mecanismos envolvidos na dissolução dos minerais, a transferência de elementos (nutrientes) para a solução do solo e posterior absorção pelas plantas. Essa etapa de caracterização geoquímica desses materiais representa um primeiro passo dentro do processo de registro dentro do MAPA.

Dessa forma, os resultados desse trabalho demonstraram que o desenvolvimento do milho foi significativamente influenciado pelo tipo de solo, pelo remineralizador aplicado e pela interação entre esses fatores. O solo arenoso apresentou melhor desempenho, especialmente em combinação com o remineralizador 1 (xisto), evidenciando sua maior eficiência agronômica. O remineralizador 2 (granito preto), por sua vez, mostrou menor eficácia, sobretudo em solo argiloso. Esses resultados ressaltam a relevância de se considerar as características físico-químicas do solo na seleção e aplicação de remineralizadores, visando à adoção de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio institucional da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), que fomentou bolsas de estudos, materiais e ambiente para a projetos de pesquisa e extensão. Ao programa de Gestão Ambiental nas Empresas (PGAMEN) pelo incentivo ao nosso projeto, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro à Chamada CNPq/CT- Mineral/CT-Energ nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de minerais estratégicos e pela concessão de bolsas de estudos dos autores.

REFERÊNCIAS

- MANNING, D. A. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. **Nature Resources Research**, v. 27, p. 217-227, 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016.**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf/view>. Acesso em: 25 maio, 2025.
- SWOBODA, R.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders. A review. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150976, 2022.
- NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. **Ensaio em ambiente controlado**. In: OLIVEIRA, A. J. *et al.* (Eds.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa SEA, 1991. p. 189-253.
- SILVA, L. N. da *et al.* **Rochagem como estratégia para fertilidade do solo e nutrição vegetal**. Cadernos de Agroecologia, v. 15, n. 2, p. 1-6, 2020.
- TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017. 574p.
- THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78 n. 4, 2006.
- YEOMANS, J. C., BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19, 13, 1467-76, 1988.
- VAN STRAATEN, P. **Agrogeology: The use of rocks for crops, Canada, Guelph University**, Chapter 5, Potassium, p. 165-200, 2007.
- VAN NOORT, R.; MØRKVED, P.; DUNDAS, S. Acid neutralization by mining waste dissolution under conditions relevant for agricultural applications. **Geosciences**, v. 8, p. 340-405, 2018.

CAPÍTULO 15

A CONTRIBUIÇÃO DO CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL NAS PESQUISAS DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO POTENCIAIS REMINERALIZADORES DE SOLOS AGRÍCOLAS

Guilherme de Resende Camara¹

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira²

INTRODUÇÃO

O Centro de Tecnologia Mineral (Cetem) é uma instituição de referência no Brasil no âmbito da pesquisa, desenvolvimento e inovação em tecnologia mineral. Vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), sua missão é “Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral” (CETEM, 2022).

Criado em 1978, o Cetem surgiu da necessidade de ampliar o conhecimento técnico-científico aplicado à mineração e ao beneficiamento de minérios no País. Desde então, consolidou-se como um dos principais polos de pesquisa mineral, desenvolvendo estudos voltados à otimização de processos, ao aproveitamento sustentável

¹ Doutor pelo Curso de Produção Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Pesquisador do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. gcamara@cetem.gov.br;

² Doutor pelo Curso de Geotecnologia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Tecnologista Sênior do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. leolysil@cetem.gov.br.

dos recursos minerais e à redução dos impactos ambientais da atividade mineradora. Além disso, a instituição mantém parcerias com universidades, centros de pesquisa e empresas do setor mineral, fomentando a inovação e a capacitação técnica.

Na perspectiva da sustentabilidade do setor de minerais não metálicos, podem ser destacados projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) já realizados tanto na sede do Cetem, localizada na cidade do Rio de Janeiro, quanto no Núcleo Regional do Espírito Santo, em Cachoeiro de Itapemirim-ES, a partir do aproveitamento de resíduos da lavra e do beneficiamento de rochas ornamentais para a fabricação de argamassa, azulejos, telhas, tijolos maciços e blocos de vedação, vidros, armações de óculos, próteses, órteses, cápsulas de café, dentre outros.

Nos últimos anos, buscando atender demandas da indústria de rochas ornamentais e ampliar a aplicabilidade dos seus estudos, o Cetem passou a atuar em pesquisas sobre remineralizadores de solos agrícolas. Essa abordagem multidisciplinar conecta a mineração ao agronegócio, promovendo o uso sustentável de resíduos da cadeia produtiva de rochas ornamentais na fertilização de solos. A partir de 2019, a instituição intensificou os esforços nessa área, consolidando-se como um dos principais agentes de pesquisa e inovação no Brasil.

Neste capítulo, serão apresentados os avanços científicos e tecnológicos do Cetem nas pesquisas voltadas aos remineralizadores de solos, destacando os principais estudos realizados, os desafios enfrentados e as perspectivas futuras para a utilização desses insumos na agricultura brasileira, contribuindo para o desenvolvimento sustentável dos setores mineral e agrícola.

AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS

A necessidade de alternativas para a fertilização dos solos agrícolas e manutenção da segurança alimentar mundial impulsionaram

as pesquisas na área dos remineralizadores de solos, estreitando as relações de demandas e possibilidades tanto do agronegócio, quanto da mineração, principalmente depois do início dos conflitos diplomáticos entre Rússia e Ucrânia em 2022.

O Centro de Tecnologia Mineral (Cetem) vem desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento e consolidação das pesquisas sobre remineralizadores de solos no Brasil. Como instituição pública de referência em tecnologia mineral, o Cetem tem contribuído significativamente para a caracterização, avaliação e aplicação de pós de rochas como fonte alternativa de nutrientes para a agricultura, promovendo o uso sustentável dos recursos minerais, diminuição de impactos ambientais, a redução da dependência externa e a inovação no setor agrícola.

INICIATIVAS INSTITUCIONAIS

Os remineralizadores de solo são materiais de origem mineral que liberam gradativamente nutrientes essenciais para as plantas e promovem a reestruturação da fertilidade dos solos, sendo considerados ambientalmente menos agressivos, de menor custo e de fácil acesso aos produtores rurais (Alovisi *et al.*, 2020; Souza, 2019;).

Ao contrário dos fertilizantes sintéticos, que fornecem nutrientes solúveis de forma imediata, os remineralizadores atuam a longo prazo, contribuindo para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Alovisi *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2023; Camara *et al.*, 2021; 2024).

O uso de rochas moídas como fonte de nutrientes não é um conceito novo, mas a validação científica da técnica tem ganhado destaque nos últimos anos. A regulamentação brasileira para remineralizadores de solo, estabelecida pela Instrução Normativa nº 05/2016 do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), incentivou a pesquisa e o desenvolvimento desses insumos, impulsionando

iniciativas que tinham por objetivo o atendimento às demandas da mineração, no que tange minoração de impactos ambientais e aumento do uso do recurso mineral, concomitantemente a necessidade de novas fontes de fertilização agrícola.

Lançado de forma inovadora no Brasil, o programa ‘Cetem Desafios’, originado a partir do ‘Edital Cetem 2019’, adotou uma abordagem de inovação aberta em sentido inverso (“problemsourcing”). Nesse modelo, empresas e demais instituições voltadas ao setor de rochas ornamentais foram incentivadas a expor seus desafios e necessidades tecnológicas. A iniciativa teve como propósito fortalecer a competitividade e a sustentabilidade do setor de rochas ornamentais, promovendo a geração de soluções concretas e aplicáveis, com transferência de tecnologia.

Entre os diversos desafios tecnológicos aprovados no âmbito desse edital, destaca-se a proposta intitulada “Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem” (Camara *et al.*, 2021). Esse projeto contou com a parceria e financiamento da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - Abirochas. Foi através desta proposta que o Cetem iniciou, no final do ano de 2019, suas pesquisas na área de potenciais remineralizadores de solos agrícolas.

Na ocasião, foi estabelecido que as pesquisas seriam realizadas com cinco diferentes rochas, onde, em conformidade com a legislação vigente, seriam analisados tanto as questões químicas e mineralógicas das rochas selecionadas, obtidas como estéreis de pedreiras de rochas ornamentais, assim como o estudo das melhores granulometrias a serem aplicadas para uma maior eficiência na liberação dos nutrientes presentes nestas rochas e seus consequentes benefícios ao sistema solo-planta.

Quanto à caracterização química e mineralógica, fundamentais para garantir a qualidade e a eficiência dos remineralizadores, o Cetem conta com toda estrutura laboratorial e corpo técnico

capacitado, utilizando técnicas avançadas, como difração de raios X (DRX), espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), para identificação da composição mineralógica e da disponibilidade de nutrientes nos materiais estudados, além dos testes de solubilização, com o intuito de verificar elementos potencialmente tóxicos - EPT.

Entretanto, para a avaliação da eficiência agronômica dos materiais, faltava ao Cetem a construção de um módulo agrícola de ambiente controlado (casa de vegetação), o que permitiria a conclusão das pesquisas em conformidade com o previsto pelo Mapa. Essa demanda física foi sanada a partir de investimentos realizados pela Abirochas junto ao Cetem - Núcleo Regional do Espírito Santo (Figura 1).

Figura 1 - Reinaldo Sampaio (Abirochas) e Dra. Silvia França (Cetem), ladeados pelos doutores Guilherme Camara (à esquerda) e Leonardo Lyrio (à direita), pesquisadores do Cetem/NRES e responsáveis pela execução do projeto sobre remineralizadores de solos obtidos a partir de rochas ornamentais, no módulo agrícola financiado pela Abirochas



Fonte: Os autores.

Inaugurado em 2022, o módulo agrícola construído no Cetem – Núcleo Regional do Espírito Santo, permitiu não somente a realização das pesquisas com remineralizadores de solos agrícolas em sua totalidade, conforme previsto na legislação vigente, mas, e principalmente, a ampliação das pesquisas a partir do atendimento de novas empresas do setor mineral.

ATUAÇÃO DO CETEM JUNTO AO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS

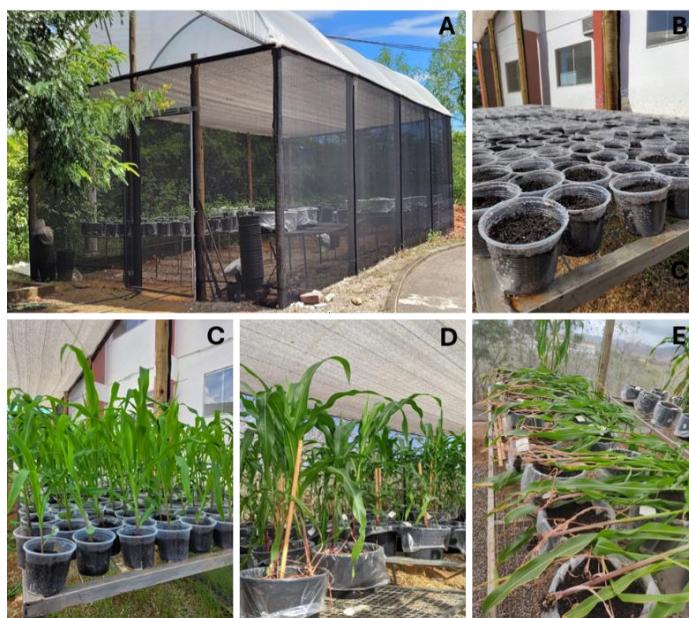
Na ocasião da construção do módulo agrícola do Cetem, a agricultura brasileira passava por uma nova transformação. Com o início dos conflitos diplomáticos entre Rússia e Ucrânia, que se intensificaram com a invasão russa ao território ucraniano em fevereiro de 2022, impactos significativos no comércio global foram observados, incluindo o setor de fertilizantes agrícolas, o que evidenciou a vulnerabilidade da agricultura brasileira em relação à dependência de fertilizantes importados e acelerou a busca por soluções que proporcionassem maior segurança alimentar. Nesse contexto, a rochagem e o uso de remineralizadores emergem como alternativas promissoras, o que acarreta aumento das buscas por pesquisas que permitam o registro desses produtos junto ao Mapa.

Por meio de contratos estabelecidos via Projetos de Inovação Tecnológica (PIT), diversas empresas passaram a recorrer ao Cetem para a realização de testes em seus estéreis, buscando alternativas para sua utilização como subproduto. Essa iniciativa não apenas agrega valor a materiais anteriormente descartados, mas também contribui para tornar a cadeia produtiva de rochas ornamentais mais sustentável. Além disso, a abordagem está alinhada aos princípios da Economia Circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

Diante desse cenário, tornou-se necessário construir o segundo módulo agrícola do Cetem (Figura 2), financiado pela própria instituição. Como consequência, houve a ampliação da equipe de pesquisa que, atualmente, inclui profissionais das áreas de Agronomia, Geologia, Engenharia de Minas e Química, abrangendo desde graduandos até doutores.

Com os dois módulos agrícolas em pleno funcionamento, o Cetem possui a capacidade de atendimento de um maior número de empresas de forma simultânea, acelerando as pesquisas por novas fontes de fertilização, resultando em uma contribuição direta aos setores mineral e agrícola.

Figura 2 - (A) segundo módulo agrícola construído no Cetem – Núcleo Regional do Espírito Santo; (B – E) Realização de pesquisas voltadas aos remineralizadores de solos agrícolas, desde a etapa de incubação até a avaliação do potencial agronômico das rochas



Fonte: Os autores.

LABORATÓRIO DE SOLOS DO CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Para fortalecer suas pesquisas na área de remineralizadores de solos, o Cetem estruturou um laboratório (Laboratório de Solos - Labsol) equipado para a realização de análises físico-químicas e mineralógicas, tanto dos materiais rochosos quanto dos solos a serem testados (Figura 3). A criação desse laboratório representa um marco para a instituição, permitindo a condução de estudos de forma autônoma e aprofundada, sem a necessidade de terceirização de ensaios. Com equipamentos modernos e metodologias avançadas, o laboratório viabiliza a caracterização detalhada dos solos e a avaliação da eficiência agronômica dos remineralizadores, consolidando o Cetem como uma referência nacional no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a fertilização agrícola.

Figura 3 - (A) Labsol; (B) Fotômetro de chama; (C) Espectrofotômetro UV-VIS; (D) Camsizer; (E) Espectrofotômetro de absorção atômica



Fonte: Os autores.

De forma inovadora e complementar aos objetivos iniciais de criação e estruturação do Labsol, os quais previam, dentre outros, o atendimento autônomo a todo o protocolo de pesquisa exigido na Instrução Normativa nº 05/2016 do Mapa, e levando em consideração diversos aspectos ambientais inerentes à aplicação de remineralizadores ao solo não considerados na atual legislação, foram iniciados estudos ecotoxicológicos com o uso de bioindicadores, objetivando garantir não apenas a eficiência agronômica do uso de remineralizadores de solos, mas também a eficiência ambiental.

A realização de estudos ecotoxicológicos desempenham um papel fundamental nas pesquisas sobre remineralizadores de solos agrícolas, garantindo a segurança ambiental e a viabilidade do uso desses materiais na fertilização. A avaliação dos possíveis impactos dos remineralizadores sobre organismos do solo, qualidade da água e biodiversidade é essencial para assegurar que sua aplicação não gere efeitos adversos a curto e longo prazo. Além disso, esses estudos auxiliam na definição de parâmetros regulatórios, contribuindo para a formulação de diretrizes que assegurem o uso sustentável e responsável dos remineralizadores, em conformidade com as exigências ambientais e agrícolas.

Na análise de risco ecológico da utilização desses insumos, as minhocas (*Eisenia andrei*) são amplamente utilizadas para estimar o potencial tóxico e a biodisponibilidade de poluentes em ecossistemas terrestres. Seu uso se justifica por sua importância na cadeia trófica do solo, por representarem uma parcela significativa da biomassa edáfica (quando presentes) e por sua sensibilidade à contaminação. Além disso, esses organismos contribuemativamente para a modificação das propriedades do solo, desempenhando funções essenciais, como a redução da suscetibilidade à erosão e a manutenção da fertilidade em sistemas agrícolas.

Nas atuais pesquisas realizadas pelo Cetem, junto ao Laudo de Eficiência Agronômica, disponibilizado à empresa contratante e que

será por ela encaminhado ao Mapa para solicitação do registro de empresa produtora e de produto remineralizador, já são previstos os testes para avaliação dos potenciais efeitos adversos do uso de remineralizadores sobre o comportamento de fuga (bioensaios de fuga) e sobrevivência (bioensaios agudos) de minhocas (*Eisenia andrei*). Os testes serão realizados seguindo normas nacionais e internacionais e serão, futuramente, estendidos a outros organismos, como os colêmbolos (*Folsomia candida*).

REGISTRO DE REMINERALIZADORES JUNTO AO MAPA

No âmbito do registro de novos remineralizadores de solos, o Cetem possui autonomia e expertise para a realização das pesquisas e emissão do Laudo de Eficiência Agronômica (LEA) que ateste a viabilidade de uso de um determinado material rochoso, demonstrando, de forma conclusiva, que o produto se presta ao fim que se destina, a partir do atendimento a todos os requisitos mínimos e máximos dispostos na IN Mapa Nº 05/2016, tanto com relação às especificações de natureza física, química e seu potencial agronômico.

No ano de 2024, fruto de uma parceria firmada por Projeto de Inovação Tecnológica com uma empresa do setor mineral, o primeiro Laudo de Eficiência Agronômica emitido pelo Cetem obteve aprovação do Mapa, sendo este um marco importante para a instituição, consolidando o Cetem como uma referência nacional no desenvolvimento de pesquisas e tecnologias sustentáveis.

DIFUSÃO DO CONHECIMENTO

O Cetem representa importante ator na articulação de redes de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), incluindo empresas privadas, universidades e instituições de referência nacional e

internacional, contribuindo socialmente no desenvolvimento de tecnologias para a produção sustentável dos recursos minerais brasileiros, e para a inovação tecnológica das empresas do setor mineral. Foram estabelecidas parcerias de PD&I com o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), com a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes), com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), com a Secretaria de Empreendedorismo e Inovação (Semp), atualmente denominada Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Setec), com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (Abirochas), com a Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), com o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes), com a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e com empresas privadas do setor de rochas ornamentais.

A relação entre o Cetem – Núcleo Regional do Espírito Santo e o Ifes – Campus Cachoeiro de Itapemirim é estratégica e se fortalece pela proximidade física entre as instituições, o que facilita a cooperação acadêmica e científica, além de viabilizar uma maior integração entre ensino, pesquisa e inovação tecnológica.

Federalizado em 2005, o Ifes Cachoeiro de Itapemirim é referência na formação de profissionais para o setor mineral, sendo a única instituição do Espírito Santo a oferecer o curso superior de Engenharia de Minas, além do curso Técnico em Mineração. Como principal via de acesso de estudantes para a atuação conjunta com o Cetem, a instituição desempenha um papel essencial na capacitação dos estudantes, possibilitando o contato direto com projetos de pesquisa aplicada e desenvolvimento tecnológico. Essa experiência fomenta a formação de profissionais qualificados e alinhados às demandas do setor produtivo.

O compartilhamento de infraestrutura e a troca constante de conhecimento entre pesquisadores, professores e alunos criam um

ambiente propício para o avanço científico e tecnológico. Dessa forma, o Ifes se consolida como um núcleo de formação acadêmica, enquanto o Cetem se estabelece como um polo de inovação na mineração e agricultura sustentável. Essa parceria não apenas fortalece o desenvolvimento regional, mas também coloca o Espírito Santo na vanguarda das pesquisas voltadas ao aproveitamento sustentável de resíduos de rochas ornamentais (Figura 4), gerando impactos positivos para a academia, a indústria e a sociedade.

Figura 4 - Capacitação dos estudantes, possibilitando o contato direto com projetos de pesquisa aplicada e desenvolvimento tecnológico



Fonte: Os autores.

Os avanços alcançados pelo Cetem na área de remineralizadores de solos agrícolas demonstram o impacto significativo da pesquisa científica no desenvolvimento sustentável do setor mineral e agrícola. A consolidação de parcerias estratégicas, aliada à produção e disseminação de conhecimento técnico-científico, reforça

o compromisso da instituição com a inovação e a sustentabilidade. Dessa forma, o Cetem segue expandindo suas fronteiras de pesquisa, contribuindo para a autonomia brasileira na fertilização do solo e promovendo soluções tecnológicas alinhadas às demandas ambientais e produtivas do País.

REFERÊNCIAS

ALOVISI, A. M. T. *et al.* Rochagem como alternativa sustentável para a fertilização de solos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 918 - 932, 2020.

ARAUJO, P., RIBEIRO, C. M., CAMARA, G. R., GOES, M. A. C., SOBRAL, L. G. S. Remineralizadores de solos: Importância e perspectivas futuras. Rio de Janeiro: **CETEM/MCTI**, v. 122, 40p. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016., Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf/view>. Acesso em: 25 maio, 2025.

CAMARA, G. R., FAITANIN, B.X., SILVEIRA, L. L. L., CHIODI FILHO, C., SANTOS, E.S. Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem – Parte I. Rio de Janeiro: **CETEM/MCTI**, v.30, 71p. 2021.

CAMARA, G. R., SANTOS, E. S., SILVEIRA, L. L. L.

Remineralizadores de solos: avaliação da conformidade frente à legislação e propostas para sua melhoria. Rio de Janeiro: **CETEM/MCTI**, v.35, 81p. 2024.

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral: Unidade de pesquisa do MCTI. Brasília, 10, março de 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/mcti/pt-br/composicao/rede-mcti/centro-de-tecnologia-mineral>>. Acesso em: 21, abril de 2025.

SOUZA, Wesley dos Santos. **Uso da rochagem para remineralização de solos de baixa fertilidade.** Wesley dos Santos Souza. 2019. 54 f.
Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019..

CAPÍTULO 16

ARGILAS E MINERAIS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA COMO ADSORVENTES DE FÓSFORO: ALTERNATIVAS PROMISSORAS PARA O CONTROLE DA EUTROFIZAÇÃO

José Etham de Lucena Barbosa¹

Ranielle Daiana dos Santos-Silva²

Juliana dos Santos Severiano³

Daniely de Lucena-Silva⁴

Amanda Myrna de Meneses e Costa⁵

Patrícia Silva Cruz⁶

-
- 1 Doutor em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos, professor do Departamento de Biologia – DB/CCBS/UEPB. ethambarbosa@servidor.uepb.edu.br.
 - 2 Doutora em Ecologia e Conservação pela Universidade Estadual da Paraíba. Pós-Doutoranda PPGEC-UEPB. ranielledaiana@hotmail.com.
 - 3 Doutora em Botânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Professora Visitante do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação (PPGEC/UEPB). jsantosseveriano@gmail.com.
 - 4 Doutorado em Ciência e Tecnologia Ambiental (UEPB). Bolsista pela FAPESQ. danyquimicg@gmail.com.
 - 5 Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação (PPGEC/UEPB). mndmyrna@gmail.com.
 - 6 Doutora em Engenharia Ambiental (UEPB). Bolsista BLD-PDRP/Pós-Doutorado UEPB. patriciacruz_biologa@hotmail.com.

INTRODUÇÃO

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB), localizada entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil, é considerada uma das maiores províncias pegmatíticas do mundo (Scorza, 1944; Souza *et al.*, 2020). Reconhecida pela rica diversidade mineralógica de seus pegmatitos – que incluem minerais industriais, gemológicos e estratégicos – a PPB abriga mais de 750 ocorrências de pegmatitos mineralizados em Be- Li-Ta, além de milhares de outros pegmatitos estéreis (Beurlen *et al.*, 2011).

Entre os minerais comumente encontrados na região da Província Pegmatítica da Borborema, destacam-se o feldspato, quartzo, mica (muscovita), caulim (caulinita), lepidolita e apatita, todos com relevância não apenas econômica, mas também ambiental. A região também é reconhecida por abrigar importantes depósitos de argilas bentoníticas, com destaque para o município de Boa Vista, no estado da Paraíba, onde se concentram as ocorrências mais amplamente estudadas e exploradas (Oliveira *et al.*, 2016).

Estudos recentes, como o realizado no Pegmatito Alto do Calango, reforçam a diversidade mineralógica da área, identificando a presença de espodumênio, feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo, muscovita, apatita e granada nas rochas da região (de Oliveira *et al.*, 2022). Essa composição mineral não apenas sustenta o potencial econômico da Província, mas também abre caminhos para aplicações inovadoras no enfrentamento de desafios ambientais. Nos últimos anos, tem crescido o interesse pelo uso de minerais naturais

ou modificados no controle da eutrofização, especialmente em reservatórios situados em regiões semiáridas, vulneráveis à proliferação de cianobactérias.

Um adsorvente é considerado eficiente quando apresenta alta seletividade, baixo custo, longa vida útil e elevada capacidade de adsorção (Priya *et al.*, 2022). No entanto, a eficácia do processo

também depende de fatores operacionais, como a dosagem do adsorvente e o tempo de contato com a substância-alvo (Usman *et al.*, 2022). A remoção de fósforo da coluna d'água pode ocorrer por meio de materiais naturais, predominantemente via processos de adsorção, enquanto materiais submetidos a tratamentos térmicos tendem a atuar principalmente por meio da precipitação química (Gubernat *et al.*, 2020). Nesse contexto, os minerais argilosos destacam-se como alternativas promissoras: são geologicamente abundantes, não tóxicos, de baixo custo (Bao *et al.*, 2024) e, portanto, representam uma solução ambientalmente sustentável para aplicação em técnicas de restauração de ambientes eutrofizados. Características hidroclimáticas da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), os reservatórios da região são frequentemente afetados por processos de eutrofização, resultando em recorrentes florações de cianobactérias. Esses corpos hídricos, fundamentais para a sobrevivência das populações locais, são utilizados em múltiplos usos, incluindo irrigação, dessedentação animal, piscicultura e abastecimento humano (Barbosa *et al.*, 2012). Tais sistemas apresentam características que os tornam particularmente vulneráveis à eutrofização: elevada concentração de fósforo nos sedimentos e baixa profundidade, o que favorece a ressuspensão do material sedimentar pela ação do vento e, consequentemente, intensifica a disponibilidade de nutrientes na coluna d'água, estimulando o crescimento excessivo de cianobactérias (Cavalcante *et al.*, 2018; 2022). Nesse contexto, o monitoramento e o controle dos níveis de fósforo, bem como da sua liberação dos sedimentos para a água, são medidas essenciais para preservar a qualidade hídrica e mitigar impactos ecológicos (Moura *et al.*, 2020). Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo caracterizar geologicamente a PPB e investigar o potencial uso de seus minerais, especialmente os argilosos, em estratégias de restauração de ambientes aquáticos impactados pela eutrofização.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA (PPB)

Segundo London (2008), os pegmatitos são definidos como rochas ígneas de composição essencialmente granítica, que se diferenciam das demais rochas magmáticas por apresentarem textura extremamente grosseira, cristais de grande porte com intercrescimentos orientados ou textura gráfica e, frequentemente, zoneamento mineral bem desenvolvido, sendo interpretados como intrusões tardias a pós-tectônicas relacionadas à evolução do Ciclo Brasiliano (600 Ma) (Silva e Legrand, 1996; Araújo *et al.*, 2005). O Quadro 1 evidencia a litologia dos principais geosítios da PPB de acordo com a literatura disponível.

Quadro 1 - Litologia dos principais geosítios da PPB

| Geosítios | Estado | Litologia | Referência |
|------------------------|--------|---|-------------------------------|
| Serra Verde | RN | Predominância de granito, constituído por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e biotita. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Cruzeiro de Cerro Corá | RN | Presença de blocos e lajes de granito de granulação média a grossa, essencialmente formado por feldspato potássico, quartzo e plagioclásio. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Tanque dos Poscianos | RN | A litologia predominante corresponde a um granito de granulação média a porfirítica, composto essencialmente por feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, anfibólito e biotita. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Lagoa do Santo | RN | Presença de lajes e blocos de granito de granulação média a grossa, compostos essencialmente por feldspato potássico (K-feldspato), plagioclásio, quartzo, biotita, anfibólito e minerais opacos. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Pico do Totoró | RN | Apresenta granitos com porções porfiríticas, compostos por feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, biotita, anfibólito, titanita e minerais opacos. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |

| Geosítios | Estado | Litologia | Referência |
|--------------------------|--------|--|-------------------------------|
| Morro do Cruzeiro | RN | Corpo pegmatítico de orientação aproximada norte-sul, composto por feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita e titanita, encaixado em micaxisto rico em biotita e granada, pertencente à Formação Seridó. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Mina Brejuí | RN | A região é composta por paragnaisse com quartzo, feldspato, biotita e minerais acessórios como epidoto, microclina, muscovita, tremolita/actinolita e opacos. As rochas cálcio-silicatadas contêm epidoto, titanita, quartzo, plagioclásio, apatita, hornblenda, malaquita, molibdenita e tremolita/actinolita. Também ocorrem lentes de mármore com calcita e acessórios como tremolita, mica branca e opacos, além de micaxistas da Formação Seridó. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Cânions dos Apertados | RN | A principal litologia é o quartzito da Formação Equador, composto majoritariamente por quartzo, com muscovita, biotita e minerais máficos subordinados. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Açude Gargalheiras | RN | O sítio é composto por granitos com feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, micas (biotita e muscovita) e acessórios como apatita, zircão, anfíbolio, titanita, alanita e minerais opacos. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Poço do Arroz | RN | Blocos de granito de granulação média a grossa, compostos por feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, biotita, anfíbolio, titanita e minerais opacos. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Cruzeiro de Acari | RN | Constituído por blocos de granito de granulação média a grossa, com cristais centimétricos de feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, biotita, anfíbolio, titanita e minerais opacos. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Marmitas do Rio Carnaúba | RN | Granitos de granulação média a grossa, com feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, biotita, anfíbolio, titanita e minerais opacos, cortados por diques graníticos finos contendo feldspato potássico, quartzo, minerais opacos, turmalina e berilo. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Serra da Rajada | RN | Corpo pegmatítico de direção NE-SW, composto por quartzo, feldspato, plagioclásio, biotita, muscovita e turmalina. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |

| Geossítios | Estado | Litologia | Referência |
|--|--------|--|-------------------------------|
| Xique-xique | RN | A litologia predominante é o quartzito da Formação Equador (Grupo Seridó), composto principalmente por quartzo, com muscovita, biotita e minerais opacos subordinados. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Cachoeira dos Fundões | RN | Predominam quartzitos e pegmatitos. Os quartzitos da Formação Equador têm granulação fina a média, coloração branca a cinza-creme, brilho micáceo e pontos escuros. São compostos por quartzo, muscovita, biotita, turmalina negra e minerais opacos. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Açude Boqueirão | RN | O geossítio apresenta geodiversidade marcadamente por metaconglomerados e quartzitos. Localiza-se no entorno da Barragem de Boqueirão. Os metaconglomerados, da Formação Equador, contêm seixos de gnaisses, xistos e quartzitos em matriz média composta por plagioclásio, quartzo, microclina, biotita, clorita, titanita e minerais opacos. | da Silva <i>et al.</i> , 2022 |
| Pegmatito Alto Serra Branca | PB | Localizado no município de Pedra Lavrada, apresenta zoneamento mineral bem definido, onde a Zona I é composta por quartzo e feldspato; a Zona II, feldspato enriquecido com mineralizações, como a turmalina preta; a Zona III, feldspato, quartzo, albita; e a Zona IV, quartzo de coloração variada utilizado na indústria de joias. | Sales <i>et al.</i> , 2015 |
| Pegmatito Alto do Urubu | PB | Possui xistos compostos por quartzo, feldspato, biotita, muscovita e granada. A maior porção do pegmatito é caracterizada pela Zona II (quartzo, feldspato, mica, tantalita e berílio) e pelo núcleo de quartzo leitoso e rosáceo. | Santos <i>et al.</i> , 2018 |
| Pegmatitos Facheiro, Mina Velha e Mina do Meio | PB | Esses pegmatitos apresentam teores diferenciados de tântalo (Ta) e nióbio (Nb) e, além disso, suas mineralizações incluem caulinata, quartzo, feldspato e mica. | Lira <i>et al.</i> , 2016 |

| Geositios | Estado | Litologia | Referência |
|------------------------|--------|---|-----------------------------|
| Pegmatito Alto do Feio | PB | Em sua zona de borda, tem-se a predominância de plagioclásio, quartzo e feldspato; já na margem do núcleo, predominância de feldspato e quartzo; e o núcleo é composto por quartzo leitoso e róseo. | Santos <i>et al.</i> , 2016 |

ARGILAS NATURAIS COMO ADSORVENTES DE FÓSFORO

As argilas são compostas por minerais com diâmetro inferior a 2 μm resultantes do intemperismo das rochas e pertencem a diferentes grupos mineralógicos, sendo os principais:

1. argilas 1:1 – são formadas pela sobreposição de tetraedros e octaedros, como a caulinita;
2. argilas 2:1 – constituídas pela sobreposição de duas camadas tetraédricas e uma octaédrica, como a montmorilinita e as micas (Mitchell, 1992).

Essa estruturação das argilas está diretamente relacionada com a capacidade de adsorver o fósforo (Huo *et al.*, 2021), uma vez que óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) presentes na composição desses minerais possuem cargas superficiais positivas que se ligam fortemente ao fosfato (PO_4^{3-}) em pH ácido. Além disso, a presença de hidroxilos (OH^-) na sua superfície permite ligações químicas estáveis com o fósforo (Ahmed *et al.*, 2023).

Neste contexto, a adsorção de ferro pelas argilas ocorre principalmente por três mecanismos, sendo eles: adsorção específica, onde são formadas ligações químicas entre os íons fosfato e óxidos de Fe e Al; precipitação, caracterizada pela formação de compostos insolúveis, como fosfatos de ferro e alumínio, que precipitam e se tornam indisponíveis; e troca iônica a partir da troca com ânions (como as

zeólitas e a bentonita) ou cátions (geralmente aluminossilicatos cristalinos) presentes na argila (Sparks, 2003).

Portanto, ao avaliar os dois grupos estruturais citados, as argilas 1:1 possuem baixa expansão interlamelar, reduzindo sua capacidade de troca catiônica (CTC), porém apresentam afinidade por adsorção específica de ânions como o fósforo, especialmente quando associadas a óxidos de Fe e Al (Gérard, 2016). Já as argilas 2:1, têm alta expansão entre suas camadas estruturais, o que confere também maior CTC, logo, adsorvem fósforo principalmente por troca iônica e por precipitação em sites interlamelares (Jia *et al.*, 2023).

POTENCIAL DE MINERAIS DA PPB NO CONTROLE DA EUTROFIZAÇÃO

A caulinita é um mineral do grupo dos filossilicatos, originado da alteração de feldspatos e micas abundantes na área, e possui potencial para aplicação ambiental devido sua eficiente absorção de fósforo. Quando quimicamente modificada com íons metálicos, como ferro (Fe^{3+}), alumínio (Al^{3+}) ou lantâni (La^{3+}), sua capacidade de adsorção de fósforo é significativamente aumentada, tornando-se uma alternativa promissora para a remediação da poluição ambiental (Bao *et al.*, 2024). Além disso, foi sugerido que a utilização de caulinita

calcinada modificada com lantâni é um adsorvente eficiente na remoção de fosfato da água por limitar a disponibilidade desse nutriente essencial ao desenvolvimento de florações de cianobactérias (Wei *et al.*, 2018).

A apatita é um mineral que pode ser encontrado naturalmente ou obtido por meio de síntese em abordagens de engenharia, tendo ganhado destaque devido à sua eficácia e ampla aplicabilidade (Li *et al.*, 2021). Considerada um adsorvente de baixo custo, a apatita apresenta grande potencial para uso em tratamentos de água (Li *et*

al., 2023). No entanto, seu uso requer cautela, uma vez que, além de atuar como adsorvente, ela também pode funcionar como fonte de nutrientes, devido à sua capacidade de liberar fosfato no meio aquático (Li *et al.*, 2023).

Outro mineral encontrado na PPB com potencial para adsorção é o quartzo. Estudos relatam que partículas de quartzo revestidas com hidróxidos de ferro e alumínio foram eficazmente utilizadas na adsorção de fósforo em águas residuárias (Arias *et al.*, 2006). Além disso, observou-se que a eficiência de adsorção aumentou com a redução da cristalinidade das partículas de quartzo revestidas com óxidos de ferro, indicando uma relação direta entre a estrutura do material e sua capacidade de remoção de fósforo (Ramasahayam *et al.*, 2014).

APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS E PERSPECTIVAS PARA RESTAURAÇÃO DE ECOSISTEMAS

A eutrofização é um dos principais problemas ambientais enfrentados pelos ecossistemas aquáticos do semiárido brasileiro, ocasionada principalmente pelo acúmulo de nutrientes, especialmente fósforo (P) e nitrogênio (N), provenientes de fontes externas e internas (Ayele & Atlabachew, 2021). Esse processo acarreta impactos diretos na qualidade da água, na biodiversidade aquática e na segurança hídrica das populações que dependem desses sistemas (Barbosa *et al.*, 2012; Calvacanti *et al.*, 2022). Frente a esse cenário, a aplicação de tecnologias baseadas na geoengenharia ambiental tem se mostrado uma estratégia promissora para a mitigação dos efeitos da eutrofização, especialmente em sistemas sujeitos a elevados índices de recirculação interna de fósforo, como é característico dos reservatórios localizados no Semiárido Brasileiro (Lucena-Silva *et al.*, 2019; Severiano *et al.*, 2023).

O QUE É E COMO FUNCIONA A TÉCNICA *FLOC AND SINK/LOCK*

A técnica conhecida como *Floc and Sink/Lock*, representa uma estratégia de geoengenharia aplicada à restauração de corpos d'água eutrofizados. Seu princípio baseia- se na remoção simultânea de fósforo e biomassa fitoplanctônica da coluna d'água, especialmente cianobactérias, por meio de processos físicos e químicos, como floculação, sedimentação e imobilização química do fósforo no sedimento (Lürling *et al.*, 2020). Na etapa inicial de floculação (*Floc*), são aplicados coagulantes, geralmente sais metálicos como sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ou policloreto de alumínio (PAC), que, ao interagirem com partículas coloidais, sólidos suspensos, fósforo dissolvido e células algais, promovem a neutralização das cargas elétricas dessas superfícies, favorecendo a formação de flocos com maior densidade (Lucena-Silva *et al.*, 2019).

Após a formação dos flocos, ocorrem as etapas de sedimentação (*Sink*), na qual esses flocos se depositam no sedimento e, por fim, a imobilização ou aprisionamento (*Lock*), onde aplica-se um material adsorvente ou inativador de fósforo, geralmente uma argila modificada, como a bentonita modificada com lantânia para garantir a eficiência do sequestro do fósforo e evitar sua remobilização. Esse adsorvente forma uma barreira reativa sobre o sedimento, promovendo o sequestro químico do fósforo em formas não biodisponíveis, como fosfatos insolúveis (LaPO_4) ou compostos complexados com alumínio ou ferro (Douglas *et al.*, 2016). Dessa forma, a técnica apresenta efeito duplo: reduz a concentração de fósforo e biomassa fitoplanctônica na coluna d'água de forma imediata e estabiliza o fósforo no sedimento, impedindo sua ressuspensão e contribuindo para a manutenção da qualidade da água a médio e longo prazo (van Oosterhout *et al.*, 2019).

O sucesso da técnica depende de fatores como o pH da água, que deve estar acima de 7 para evitar a solubilização de metais, além

das características físico e químicas do sistema, incluindo alcalinidade, turbidez, teor de matéria orgânica, composição da comunidade fitoplanctônica e presença de organismos bioturbadores que possam comprometer os processos de sedimentação e retenção do fósforo (Severiano *et al.*, 2023).

APLICAÇÕES NO SEMIÁRIDO: EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS

Evidências empíricas demonstram a aplicabilidade e a eficácia dessa técnica em ambientes semiáridos. No estudo conduzido por Lucena-Silva *et al.* (2019), realizado no reservatório Argemiro de Figueiredo, no estado da Paraíba, caracterizado por elevada concentração de fósforo ($945 \pm 21 \mu\text{g P L}^{-1}$) e florações persistentes de cianobactérias, verificou-se que a combinação de coagulantes como PAC ou sulfato de alumínio associados à bentonita modificada com lantâncio proporcionou reduções de até 91% do fósforo reativo solúvel (SRP) e 86% da biomassa fitoplanctônica, além de uma diminuição significativa da turbidez da água. Esse mesmo estudo demonstrou que a aplicação da técnica não promoveu lise celular significativa, fato de extrema relevância, visto que a lise celular poderia resultar na liberação de cianotoxinas para a coluna d'água, aumentando os riscos ecotoxicológicos, como observados em outros estudos com uso inadequado de agentes coagulantes (Miranda *et al.*, 2017; Mucci *et al.*, 2017).

Apesar da elevada eficiência observada, os resultados variaram conforme a morfologia das espécies de cianobactérias predominantes. Espécies filamentosas dotadas de aerótopos, como *Planktothrix agardhii* e *Raphidiopsis raciborskii*, demonstraram maior resistência quando o tratamento foi realizado exclusivamente com coagulantes naturais, como a quitosana (Lucena-Silva *et al.*, 2019). Esse comportamento indica que a seleção dos reagentes e suas dosagens devem ser estrategicamente definidas, considerando as características morfológicas da comunidade fitoplanctônica alvo.

O estudo de Lucena-Silva *et al.* (2022) ampliou a compreensão desses processos, demonstrando que grupos funcionais do fitoplâncton, definidos com base em características morfológicas de resistência à sedimentação, respondem de forma diferenciada aos tratamentos com coagulantes e argilas. Espécies que possuem adaptações estruturais que conferem flutuabilidade, como flagelos, mucilagem e aerótopos, mostraram-se significativamente mais resistentes à sedimentação, exigindo, portanto, a combinação de coagulantes metálicos com argilas modificadas para alcançar a eficiência desejada na remoção desses organismos da coluna d'água.

BIOTURBAÇÃO: UM DESAFIO PARA O *LOCK*

Um dos desafios adicionais na aplicação da técnica *Floc and Lock* em ambientes naturais está relacionado à influência da bioturbação, isto é, da movimentação do sedimento promovida por organismos bentônicos. Severiano *et al.* (2023) demonstraram que a eficácia da técnica pode ser sensivelmente alterada pela atividade de macroinvertebrados bentônicos. O estudo revelou que larvas de *Chironomus sancticaroli* favorecem a remoção de fósforo e biomassa algal da coluna d'água, auxiliando na sua deposição e estabilização no sedimento por meio de processos de bioirrigação, que aumentam a oxidação do fósforo e sua imobilização no sedimento. Por outro lado, os moluscos *Melanoides tuberculata* exercem o efeito oposto, promovendo a ressuspensão dos flocos sedimentados e, consequentemente, elevando as concentrações de fósforo e de clorofila na coluna d'água. Adicionalmente, foi constatado que esses moluscos ingerem os flocos sedimentados, que contêm biomassa cianobacteriana potencialmente tóxica, o que levanta preocupações adicionais sobre os riscos ecotoxicológicos associados ao processo de bioacumulação (Severiano *et al.*, 2023).

POTENCIAL DOS MINERAIS DA PPB

Diante desse panorama, a utilização dos minerais abundantes na Província Pegmatítica da Borborema (PPB) desponta como uma alternativa sustentável, economicamente viável e tecnicamente robusta para a implementação de soluções baseadas na geoengenharia ambiental. Minerais como caulinita, bentonita e quartzo, seja na forma natural ou modificados com metais como lantânio, alumínio ou ferro, apresentam propriedades físico-químicas ideais para a adsorção de fósforo, formação de barreiras reativas no

sedimento e redução da turbidez e da biomassa fitoplanctônica (Lucena-Silva *et al.*, 2019; Severiano *et al.*, 2023).

O estudo recente de Monicelli *et al.* (2025) reforça a viabilidade do uso de materiais naturais como argilas adsorventes de fósforo alternativos na aplicação da técnica *Floc and Sink* em ambientes do Semiárido. Nesse trabalho, foram avaliados o desempenho de diferentes materiais, incluindo planossolo e dois tipos de calcário (calcítico e dolomítico), combinados com policloreto de alumínio (PAC), na remoção de biomassa fitoplanctônica em dois reservatórios localizados na bacia do Seridó, no Rio Grande do Norte. Os resultados demonstraram que a combinação de PAC com lastros naturais proporcionou remoções de biomassa variando entre 70% e 80%, desempenho consideravelmente superior ao uso do coagulante isolado, confirmando a eficiência desses materiais na promoção da sedimentação de fitoplâncton. Além disso, foi observada maior eficácia na adsorção do fósforo em solos ricos em caulinita, destacando a importância desse mineral em estratégias de restauração de ecossistemas aquáticos eutrofizados (Vilar *et al.*, 2010; Calvacante *et al.*, 2021).

Além das argilas já mencionadas, a caulinita tem sido amplamente investigada devido à sua capacidade de adsorção de fosfatos, apresentando eficiência de remoção de até 69% em sua forma natural

(Fizir *et al.*, 2024) e cerca de 90% quando modificada com lantânia, especialmente em ambientes eutróficos (Zheng *et al.*, 2023). A avaliação e validação do uso dessas substâncias representam uma estratégia promissora e de baixo custo para o controle da eutrofização, contribuindo para a recuperação da qualidade ambiental e a manutenção dos múltiplos usos da água. Essa abordagem é especialmente relevante diante do contexto em que cerca de 70% dos reservatórios da Paraíba apresentam estado trófico elevado (Governo do Estado da Paraíba, 2022), tornando o controle da eutrofização fundamental para a segurança hídrica e a saúde pública (Igwaran *et al.*, 2024; Moreira *et al.*, 2021).

O avanço na aplicação de novas técnicas com minerais presentes na PPB é particularmente relevante para a realidade do Semiárido, uma vez que, os materiais testados são abundantes, de baixo custo e de fácil acesso na região, o que representa uma solução tecnicamente viável e economicamente atrativa para sistemas onde o uso de argilas modificadas, como a bentonita com lantânia, pode ser financeiramente inviável. O uso desses materiais locais não apenas reduz custos operacionais, mas também fortalece os princípios da sustentabilidade socioambiental, promovendo soluções baseadas em recursos naturais regionais para a mitigação dos impactos da eutrofização.

Esses achados consolidam a importância de direcionar esforços para a caracterização físico-química dos minerais disponíveis na PPB e para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis que incorporem esses materiais em estratégias de manejo e restauração de ecossistemas aquáticos eutrofizados no Semiárido.

PERSPECTIVAS FUTURAS

As perspectivas futuras para a aplicação dessa técnica no contexto dos reservatórios do Semiárido Brasileiro incluem a integração

com práticas de manejo das bacias hidrográficas, que visem reduzir a carga externa de nutrientes, além do desenvolvimento de adsorventes mais seletivos e eficientes, produzidos a partir dos minerais da PPB funcionalizados com metais de baixo impacto ambiental, como ferro e lantânio. Também se destaca a necessidade do monitoramento contínuo da fauna bentônica, a fim de mitigar os efeitos adversos da bioturbação, seja por meio de controle biológico ou de intervenções físicas adequadas. Além disso, é fundamental a formulação de protocolos específicos para a aplicação da técnica em ambientes do Semiárido, considerando as particularidades hidroclimáticas da região, que incluem longos períodos de estiagem, altas taxas de evaporação e elevada variabilidade interanual na precipitação. Nesse cenário, no qual a grande maioria dos reservatórios da Paraíba e de outras regiões do Semiárido nordestino encontra-se em avançado estado de eutrofização, a adoção de tecnologias baseadas na geoengenharia com uso dos minerais da PPB não se configura apenas como uma possibilidade técnica, mas como uma necessidade estratégica para garantir a segurança hídrica, a qualidade ambiental e o desenvolvimento sustentável da região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB) possui rica diversidade mineralógica, incluindo minerais argilosos (caulinita e bentonita), apatita e quartzo, com potencial para aplicações ambientais. Este estudo evidenciou que esses minerais, abundantes e de baixo custo, podem atuar como adsorventes naturais de fósforo, auxiliando no controle da eutrofização em reservatórios do semiárido tropical. A análise litológica dos geossítios da PPB indica seu valor econômico e ecológico, reforçando sua importância para a sustentabilidade socioambiental da região. Além disso, soluções baseadas em geoengenharia, como o uso desses minerais locais na adsorção

de fósforo, representam uma estratégia inovadora e necessária para enfrentar os desafios hídricos e ecológicos do Semiárido. Neste contexto, sugerimos que pesquisas futuras aprofundem a caracterização físico-química desses materiais e desenvolvam protocolos de aplicação adaptados às condições locais, consolidando a PPB como fonte de insumos naturais para a gestão integrada de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. N. C. *40Ar/39Ar geochronology of gold mineralization in brasiliano strike-slip shear zones in the Borborema Province, NE Brazil*. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 19, p. 445–460, 2005.
- ARIAS, M.; DA SILVA-CARBALLAL, J.; GARCÍA-RÍO, L.; MEJUTO, J.; NÚÑEZ, A. *Retention of phosphorus by iron and aluminioxides-coated quartz particles*. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 295, n. 1, p. 65–70, 1 mar. 2006.
- AYELE, H. S.; ATLABACHEW, M. *Review of characterization, factors, impacts, and solutions of lake eutrophication: lesson for Lake Tana, Ethiopia*. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.l.], p. 1–20, 2021.
- BAO, T.; DAMTIE, M. M.; WANG, C. Y.; CHEN, Z.; TAO, Q.; WEI, W.; NI, B. J. *Comprehensive review of modified clay minerals for phosphate management and future prospects*. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. –, p. 141425, 2024.
- BARBOSA, J. E. D. L.; MEDEIROS, E. S. F.; BRASIL, J.; CORDEIRO, R. D. S.;
- CRISPIM, M. C. B.; SILVA, G. H. G. D. *Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management*. **Acta Limnologica Brasiliensis**, v. 24, p. 103–118, 2012.
- BEURLEN, H.; MOURA, O. J. M.; SOARES, D. R.; SILVA, M. R. R.; RHEDE, D. *Geochemical and geological controls on the genesis of gem-quality “Paraíba Tourmaline” in granitic pegmatites from*

northeastern Brazil. **The Canadian Mineralogist**, v. 49, n. 1, p. 277–300, 2011.

CAVALCANTE, H.; ARAÚJO, F.; BECKER, V.; LUCENA-BARBOSA, J. E. Control of internal phosphorus loading using coagulants and clays in water and the sediment of a semiarid reservoir susceptible to resuspension. **Hydrobiologia**, [S.l.], p. 1–13, 2022.

CAVALCANTE, H.; ARAÚJO, F.; NOYMA, N. P.; BECKER, V. Phosphorus fractionation in sediments of tropical semiarid reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 619, p. 1022–1029, 2018.

DE OLIVEIRA, J. V.; AZEVEDO, A. T. A.; LISBOA, V. A. C.; DE VASCONCELOS, N. I. F.; DOS SANTOS OLIVEIRA, J. R.; DE SÁ, C. D. M. Mapeamento geológico do Pegmatito Alto do Calango, Província Pegmatítica da Borborema. **Revista Principia**, v. 59, n. 4, p. 1262–1277, 2022.

DOUGLAS, G. B.; HAMILTON, D. P.; ROBB, M. S.; PAN, G.; SPEARS, B. M.; LÜRLING, M. Guiding principles for the development and application of solid-phase phosphorus adsorbents for freshwater ecosystems. **Aquatic Ecology**, v. 50, n. 3, p. 385–405, 2016.

FIZIR, M.; RICHA, A.; TOUIL, S.; FERMOUS, R.; TAHIR, C.; HASSENE, I.; WEI, L.; DOUBA, H. Comparing adsorption properties of Algerian kaolinite towards phosphate with those of activated carbon: adsorption experiments, molecular modeling and an initiative toward hydroponic wastewaters remediation. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 235, 2024.

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils – a myth revisited. **Geoderma**, v. 262, p. 213–226, 2016.

GUBERNAT, S.; MASŁOŃ, A.; CZARNOTA, J.; KOSZELNIK, P. Reactive materials in the removal of phosphorus compounds from wastewater - **A review**. **Materials**, v. 13, n. 15, p. 3377, 2020.

HUO, J.; MIN, X.; WANG, Y. Zirconium-modified natural clays for phosphate removal: effect of clay minerals. **Environmental Research**, v. 194, p. 110685, 2021.

IGWARAN, A.; KAYODE, A. J.; MOLOANTOA, K. M.; KHETSHA, Z. P.; UNUOFIN, J. O. Cyanobacteria harmful algae blooms: causes, impacts, and risk management. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 71, 2024.

JIA, C.; CHI, J.; ZHANG, W. Adsorption effects and mechanisms of phosphorus by nanosized laponite. **Chemosphere**, v. 331, p. 138684, 2023.

LI, Z.; GONG, Y.; ZHAO, D.; DANG, Z.; LIN, Z. Enhanced removal of zinc and cadmium from water using carboxymethyl cellulose-bridged chlorapatite nanoparticles. **Chemosphere**, v. 263, p. 128038, 2021.

LI, Z.; QIU, Y.; ZHAO, D.; LI, J.; LI, G.; JIA, H.; KONG, L. Application of apatite particles for remediation of contaminated soil and groundwater: a review and perspectives. **Science of The Total Environment**, v. 904, p. 166918, 2023.

LONDON, D. Pegmatites. Canadian Mineralogist Special Publication, v. 10, 347 p., 2008.

LUCENA-SILVA, D.; MOLOZZI, J.; SEVERIANO, J. S.; BECKER, V.; BARBOSA, J. E. L. Removal efficiency of phosphorus, cyanobacteria and cyanotoxins by the “flock & sink” mitigation technique in semi-arid eutrophic waters. **Water Research**, v. 159, p. 262–273, 2019.

LUCENA-SILVA, D.; SEVERIANO, J. S.; SILVA, R. D. S.; BECKER, V.; BARBOSA, J. E. L.; MOLOZZI, J. Impacts of the Floc and Sink technique on the phytoplankton community: a morpho-functional approach in eutrophic reservoir water. **Journal of Environmental Management**, v. 308, p. 114626, 2022.

LÜRLING, M.; KANG, L.; MUCCI, M.; VAN OOSTERHOUT, F.; NOYMA, N. P.; MIRANDA, M.; HUSZAR, V. L. M.; WAAJEN, G.; MARINHO, M. M. Coagulation and precipitation of cyanobacterial blooms. **Ecological Engineering**, v. 158, p. 106032, 2020.

MIRANDA, M.; NOYMA, N.; PACHECO, F. S.; DE MAGALHÃES, L.; PINTO, E.; SANTOS, S.; SOARES, M. F. A.; HUSZAR, V. L.; LÜRLING, M.; MARINHO, M. M. The

efficiency of combined coagulant and ballast to remove harmful cyanobacterial blooms in a tropical shallow system. **Harmful Algae**, v. 65, p. 27–39, 2017.

MITCHELL, J. K. *Fundamentals of soil behavior*. 2. ed. New York: **John Wiley & Sons, Inc.**, 1992. 437 p.

MONICELLI, F.; ARAÚJO, F.; DA CUNHA, K. P. V.; DIAS, J. D.; BECKER, V. Effects of the Floc & Sink technique on the biomass and composition of phytoplankton morpho-functional groups using natural ballasts. **Hydrobiologia**, v. 852, p. 3081–3094, 2025.

MOREIRA, C.; CAMPOS, A.; MARTINS, J. C.; VASCONCELOS, V.; ANTUNES, A. Review on cyanobacterial studies in Portugal: current impacts and research needs. **Applied Sciences**, v. 11, n. 10, 2021.

MOURA, D. S.; NETO, I. E. L.; CLEMENTE, A.; OLIVEIRA, S.; PESTANA, C. J.; DE MELO, M. A.; CAPELO-NETO, J. Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. **Chemosphere**, v. 246, p. 125686, 2020.

OLIVEIRA, C. D.; ROCHA, M. C. G.; SILVA, A. D.; BERTOLINO, L. C. Characterization of bentonite clays from Cubati, Paraíba (Northeast of Brazil). **Cerâmica**, v. 62, n. 363, p. 272–277, 2016.

PRIYA, E.; KUMAR, S.; VERMA, C.; SARKAR, S.; MAJI, P. K. A comprehensive review on technological advances of adsorption for removing nitrate and phosphate from waste water. **Journal of Water Process Engineering**, v. 49, p. 103159, 2022.

RAMASAHHAYAM, S. K.; GUZMAN, L.; GUNAWAN, G.; VISWANATHAN, T. A comprehensive review of phosphorus removal technologies and processes. **Journal of Macromolecular Science, Part A**, v. 51, n. 6, p. 538–545, 2014.

SANTOS, L. M.; SALES, E. D. G.; VIEIRA, F. F. Revisitando o Pegmatito Alto Serra Branca, Município de Pedra Lavrada (PB): mapeamento geológico, aspectos de campo e zoneamento mineral. **HOLOS**, v. 8, p. 397–407, 2016.

SANTOS, R. Y. O.; LISBOA, V. A. C.; OLIVEIRA, J. R. S.; BARROS, T. S. C.; SANTOS, T. J. C.; BARROS, P. S. C.

Mapeamento geológico do Pegmatito Alto do Urubu, município de Picuí (PB), Faixa Seridó, Província Pegmatítica da Borborema. **Revista Principia**, v. 1, n. 43, p. 222–233, 2018.

SCORZA, E. P. *Província Pegmatítica da Borborema*. Rio de Janeiro: DNPM, 1944.

SEVERIANO, J. S. S.; DE LIMA, E. R. P.; DE LUCENA-SILVA, D.; ROCHA, D. K. G.; VERÍSSIMO, M. E. S.; FIGUEIREDO, B. R. S.; BARBOSA, J. E. L.; MOLOZZI, J. The role of bioturbation triggered by benthic macroinvertebrates in the effectiveness of the Floc & Lock technique in mitigating eutrophication. **Water Research**, v. 246, p. 120691, 2023.

SILVA, L. W.; LEGRAND, J. M. Termobarometria no depósito aurífero de São Francisco (RN): evolução metamórfica e caracterização P-T da mineralização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Natal. *Atas...* Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1996. p. 346–349.

SILVA, M. L. N. da; NASCIMENTO, M. A. L. do; SANTOS COSTA, S. S. dos. Geoheritage of a Brazilian semi-arid environment: the Seridó aspiring UNESCO Geopark. **Geoheritage**, v. 14, n. 1, p. 36, 2022.

SOUZA, I. M. B. A.; BARRETO, S. B.; SANTOS, G. L.; ARAÚJO NETO, J. F.; GUIMARÃES, I. P. A mineralogia acessória do Amazonita Pegmatito Serra Branca: classificação de um pegmatito NYF na Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 20, n. 3, p. 47–61, 2020.

SPARKS, D. L. *Environmental Soil Chemistry*. San Diego: Academic Press, 2003. USMAN, M. O.; ATURAGABA, G.; NTALE, M.; NYAKAIRU, G. W. A review of adsorption techniques for removal of phosphates from wastewater. **Water Science & Technology**, v. 86, n. 12, p. 3113–3132, 2022.

VAN OOSTERHOUT, F.; WAAJEN, G.; YASSERI, S.; MARINHO, M. M.; NOYMA, N. P.; MUCCI, M.; DOUGLAS, G.; LÜRLING, M. Lanthanum in water, sediment, macrophytes and chironomid larvae following application of lanthanum modified bentonite to Lake

Rauwbraken (The Netherlands). **Science of The Total Environment**, v. 677, p. 135188, 2019.

VILAR, C. C.; COSTA, A. C. S.; HOEPERS, A.; JUNIOR, I. G. S. Maximum phosphorus adsorption capacity as related to iron and aluminum forms in subtropical soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 1059-1068, 2010.

WEI, Y.; YUAN, P.; SONG, Y.; LIU, D.; LOSIC, D.; TAN, D.; ZHOU, J. Activating 2D nano-kaolinite using hybrid nanoparticles for enhanced phosphate capture. **Chemical Communications**, v. 54, n. 82, p. 11649-11652, 2018.

ZHENG, S.; FAN, J.; LU, X. Heated kaolinite-La(III) hydroxide complex for effective removal of phosphate from eutrophic water. **Applied Clay Science**, v. 231, 2023.

POSFÁCIO

A leitura da coletânea de artigos que compõem essa obra, nos conduz para um conjunto de reflexões a cerca das contradições seculares que formam o perfil do Nordeste e, em particular, do Semiárido brasileiro.

Os estudos apresentados sobre a Província Pegmatítica da Borborema, uma pequena fração do território nacional, evidenciam a extraordinária e complexa geodiversidade brasileira. Neles, vimos desfilar inúmeras substâncias minerais de relevante função para as atividades industriais, fortalecendo a máxima de que “a mineração é a indústria das indústrias”, porque dela depende o suprimento das matérias-primas para a produção de quase todos os bens demandados pela sociedade. A localização dessa Província no coração do semiárido, amplia a sua significação socioeconômica, evidenciando a necessidade da ação pública para estimular e viabilizar os investimentos que objetivem o aproveitamento econômico das suas riquezas.

O progresso das nações deriva, originalmente, não dá pura existência dos fatores naturais e humanos disponíveis, mas, da sua integração orientada para a transformação das riquezas naturais em riqueza social. É essa integração da natureza e dos indivíduos que, através da capacidade produtiva humana, aciona o ciclo virtuoso do crescimento econômico, que pode levar ao desenvolvimento integral das sociedades.

No mesmo contexto, a coletânea traz informações preciosas a respeito da agricultura familiar no Semiárido nordestino. Sua relevância ao representar cerca de 45% de todas as propriedades de agricultura familiar do Brasil, por ocupar um contingente superior

a 15 milhões de pessoas (3,65 milhões de famílias), o que faz do Semiárido brasileiro o mais populoso de todas as regiões semiáridas do mundo; de ser um ambiente de produção de alimentos, entendendo-se, de bens essenciais para a reprodução da força de trabalho, mas, não só, também um espaço produtor de soja e algodão, evidenciando que, apesar das adversidades climáticas, é possível a manutenção de atividades produtivas de grande relevância, em especial, para a segurança alimentar nas cidades.

Sabe-se, entretanto, que, no contexto nordestino, predominam propriedades desestruturadas, onde a família não consegue viver do produto da terra. As políticas de financiamento à agricultura familiar, ainda que amenizem as carências materiais dos produtores, não transformam a sua realidade. As adversidades climáticas, por serem mitigáveis tecnicamente, dependem da vontade política para serem enfrentadas. É preciso um esforço maior de organização da produção, assistência técnica continuada e o desenvolvimento de novas tecnologias que melhorem a produtividade da agricultura familiar e a “Rochagem” se apresenta como um elemento integrador da riqueza mineral com o potencial agrícola da região. O aproveitamento econômico dos “estoques remanescentes da mineração”, usados para os fins de nutrientes agrícolas e remineralizadores de solos, cujos efeitos diretos e indiretos impactam positivamente a produtividade agrícola, se inserem no campo de políticas estratégicas nacionais, por razões amplamente conhecidas e agravadas com os conflitos geopolíticos em curso.

Neste particular, a Rochagem expressa uma dimensão da atividade mineral que ultrapassa a sua função útil de nutrir e rejuvenescer os solos, em especial do Nordeste, submetidos, desde o início da colonização portuguesa e por longos séculos, a práticas predatórias. Os autores, ao utilizarem a expressão “aproveitamento dos estoques remanescentes da mineração”, fortalecem e disseminam um conceito que altera, substancialmente, o de uso corrente denominado

“resíduos sólidos”; este, indutor do entendimento de algo imprestável que deve ser descartado de modo tecnicamente adequado.

As palavras e as coisas têm profundo significado na construção da consciência social, como nos mostra o filosofo Michel Foucault em obra do mesmo título, daí a relevância de formular conceitos que elevem as nossas “humanidades”. A definição de “estoques remanescentes da mineração” lhes garante a permanência da condição de riqueza mineral, exigindo de todos os atores envolvidos um novo olhar e uma nova compreensão do objeto. O desenvolvimento das forças produtivas conduziu a sociedade a um estágio histórico de intenso consumo e desperdício, acelerando os modos de apropriação da natureza. Essa mesma sociedade está a exigir avanços em todas as dimensões das atividades econômicas que nos reconduzam a um novo nível da racionalidade produtiva . O aumento dos cuidados com o meio ambiente, a reciclagem dos bens, a economia circular e a economia ecológica são indicativos dessas exigências que se constituem como evidências do surgimento de um novo ciclo civilizatório.

Os valiosos trabalhos apresentados são, ao mesmo tempo, uma demonstração de conhecimento científico das realidades estudadas e uma sinalização ratificadora de indispensável integração da mineração com a agricultura, duas potências competitivas brasileiras. Além disso, abrem portas para o desenvolvimento do Semiárido nordestino que expressa a mais cruel e desafiadora consequência social das desigualdades regionais do Brasil.

Vale dizer que tais pretensões dependerão de políticas públicas assertivas que cumpram a sua finalidade de estimuladoras de condutas, nesse caso, somente possível, inexoravelmente, através de “sanções premiais”, próprias do campo funcional do Direito e que está em oposição aos imperativos do Direito positivo que orienta nosso ordenamento jurídico, fundado no princípio de “punir por haver praticado o proibido ou punir por deixar de fazer o obrigatório”.

O sucesso dessa integração intersetorial contribuirá para o aprimoramento do arcabouço regulatório atual, apenas fiscalizatório e ordenador, e atenderá ao anseio civilizatório da sociedade de modo a trazer uma percepção mais racional e menos emocional em relação à atividade minerária, além de contribuir positivamente para a imagem do Brasil e da mineração brasileira nos mercados internacionais e nas suas respectivas sociedades. Portanto, a obra que acabaram de ler, é portadora de muitas virtudes, traduzidas em conhecimentos e proposições coerentes.

Assim como reflete o grande economista nordestino, Celso Furtado, de quem todos nós, economistas, somos alunos: “Um país com tantas riquezas naturais que se mantém pobre e preserva níveis de desigualdade social mais graves que a de países com economias menores e menos riquezas naturais, há algo **historicamente construído** na produção do desemprego e da pobreza”.

Saber como foi feito o caminho que produziu a pobreza é o que permite destruí-lo e refazê-lo, orientando a nação para o desenvolvimento.

Senti-me muito honrado por realizar o Posfácio dessa obra.

Salvador-BA, 08 de junho de 2025.

Economista Reinaldo Dantas Sampaio

Presidente da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
- (ABIROCHAS).

Sobre o livro

Revisão Linguística | Elizete Amaral de Medeiros

Capa, Projeto Gráfico e Diagramação | Jefferson Ricardo Lima A. Nunes

Tipologias Utilizadas | Cambria 13/16pt
Adobe Caslon Pro 12/14pt

Formato | 15 x 21 cm

A recuperação de áreas degradadas é um dos maiores desafios ambientais do Semiárido brasileiro. Este livro reúne conhecimentos essenciais sobre mineração, agricultura familiar, rochagem e sustentabilidade, apresentando uma visão integrada que conecta ciência, tecnologia e práticas de campo.

Resultado do trabalho colaborativo de pesquisadores de diversas instituições, a obra aborda desde a geologia da Província Pegmatítica da Borborema até soluções inovadoras para o manejo do solo e o uso de remineralizadores.

Clara, objetiva e fundamentada, esta publicação oferece reflexões e ferramentas indispensáveis para estudantes, profissionais, gestores públicos e todos que buscam compreender e promover o desenvolvimento sustentável em regiões semiáridas.

Um convite para transformar desafios ambientais em oportunidades de progresso socioeconômico.

ISBN 978-65-268-0086-7



9 786526 800867

