

Série Tecnologia Mineral

Processos biotecnológicos para a solubilização de rochas fosfáticas – O estado da arte

Tamara Azevedo Schueler
Marcelo de Luccas Dourado
Andréa Camardella de Lima Rizzo



SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

**Processos biotecnológicos para a solubilização de rochas
fosfáticas – O estado da arte**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Jair Messias Bolsonaro

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Marcos Cesar Pontes

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Julio Francisco Semeghini Neto

Secretário Executivo

Gerson Nogueira Machado de Oliveira

Subsecretário de Unidades Vinculadas

Cesar Augusto Rodrigues do Carmo

Coordenador-Geral de Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Gustavo Silva Menezes

Coordenador de Administração – COADM

Robson de Araújo D'Ávila

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação – COPGI

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais – COPTM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais – COPMA

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador do Núcleo Regional do Espírito Santo – CONES

José Antônio Pires de Mello

Coordenador de Análises Minerais – COAMI

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

ISSN 0103-7382

ISBN 978-85-8261-105-0

STM - 102

Processos biotecnológicos para a solubilização de rochas fosfáticas – O estado da arte

Tamara Azevedo Schueler

Microbiologista, MSc. em Ciências (Microbiologia),
Bolsista PCI do SEPMB/COPMA - CETEM/MCTIC

Marcelo de Luccas Dourado

Engenheiro Químico - CETEM/MCTIC

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Engenheira Química, DSc. Tecnologista Sênior
COPMA/CETEM/MCTIC

CETEM/MCTIC

2019

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

Marisa Bezerra de Mello Monte

Editora

Claudio Luiz Schneider

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Arnaldo Alcover Neto (CETEM), Fernando A. Freitas Lins (CETEM), Regina Coeli C. Carrisso, (CETEM), Reiner Neumann (CETEM), Ronaldo Luiz C. dos Santos (CETEM), Achilles Junqueira B. Dutra (UFRJ), Antonio E. Clark Peres (UFMG), José Aury de Aquino (CDTN), José Farias de Oliveira (UFRJ), Lino R. de Freitas (CVRD), Luciano Tadeu da S. Ramos (CVRD), Mário Rui M. Leite (IGM-PORTUGAL) e Maurício L. Torem (PUC-RIO).

A Série Tecnologia Mineral publica trabalhos na área minerometalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Revisão

Ana Maria Silva Vieira de Sá

CRB7 3982

Catálogo na Fonte

Schueler, Tamara Azevedo

Processos biotecnológicos para a solubilização de rochas fosfáticas – O estado da arte / Tamara A. Schueler, Marcelo L. Dourado, Andréa Camardella L. Rizzo. __ Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019.

45p. il. (Série Tecnologia Mineral, 102)

1. Fósforo. 2. Biossolubilização. 3. Fertilizantes. 4. Resíduos de mineração. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Dourado, Marcelo de Luccas. III. Rizzo, Andréa Camardella de Lima. IV. Título. V. Série.

CDD – 668.62

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 FÓSFORO	17
2.1 Reservas Mundiais de Fósforo	19
2.2 Reservas Brasileiras	21
2.3 Resíduos Sólidos Gerados na Atividade de Mineração	26
3 BIOPROCESSOS APLICADOS NA OBTENÇÃO DE FÓSFORO	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

RESUMO

A rocha fosfática é a única fonte de fósforo viável para uso na agricultura, sendo 90% da produção destinada para esse fim. O Brasil é um dos principais produtores mundiais de produtos agrícolas, desempenhando papel significativo no suprimento global de alimentos. Sua agricultura se expandiu rapidamente nas últimas décadas devido, principalmente, ao aumento da aplicação de fertilizantes ao solo, com consequente aumento da produtividade agrícola brasileira. Essa combinação vem ao encontro do crescimento da população e da demanda por produtos de origem agrícola. Por esse motivo, o Brasil é o quarto consumidor de NPK no mundo. No entanto, mais de 50% do fósforo usado como matéria-prima para produção de fertilizantes no país é importado. Ainda assim, o Brasil possui uma extensa área territorial com uma grande disponibilidade de recursos minerais. Cinco minas de fosfato foram classificadas entre as maiores minas brasileiras em produção anual. Em 2015, o país produziu 6,1 milhões de toneladas de concentrado de rocha fosfática. Os estados de Minas Gerais e Goiás se destacam por serem grandes produtores nacionais, concentrado cerca de 80% dessa produção. Por outro lado, o processo de extração de rochas fosfáticas gera grandes volumes de resíduos, apresentando, em sua composição, teores significativos de fósforo, os quais poderiam ainda ser explorados. A importância global da agricultura brasileira e seu impacto na economia nacional reforçam a necessidade de associar a alta produção agrícola ao uso sustentável dos recursos naturais e a redução de um possível impacto ambiental associado à disposição inadequada de resíduos, como só gerados na área mineral. Neste cenário, os processos biotecnológicos têm se mostrado eficientes e extremamente interessantes do ponto de vista ambiental, podendo ser uma alternativa tecnológica atraente e sustentável para a produção de fertilizantes fosfatados. Além disso, diversos trabalhos têm indicado que as reservas mundiais de fósforo se esgotarão ainda neste século, o que torna imprescindível a busca por novas tecnologias.

Palavras-chave

Fósforo, biossolubilização, fertilizantes, resíduos de mineração.

ABSTRACT

Phosphate rock is the only viable source of phosphorus for use in agriculture and 90% of which is destined for this purpose. Brazil is one of the world's leading producers of agricultural products, playing a significant role in the global supply of food. Agriculture activities have expanded rapidly in the last decades due, mainly, to the increase of the application of fertilizers to the soil, with consequent increase of the Brazilian agricultural productivity. This combination meets the growth of the population and the demand for agricultural products. For this reason, Brazil is the fourth NPK consumer in the world. However, more than 50% of the phosphorus used as raw material for fertilizer production in the country is imported. Nevertheless, Brazil has an extensive territorial area with a great availability of mineral resources. Five phosphate mines were classified among the largest Brazilian mines in annual production. By 2015, the country produced 6.1 million tons of phosphate rock concentrate. The states of Minas Gerais and Goiás stand out for being large national producers, concentrating around 80% of this production. On the other hand, the process of extraction of phosphate rocks generates large volumes of waste, presenting, in its composition, significant levels of phosphorus, which could still be explored. The global importance of Brazilian agriculture and its impact on the national economy reinforce the need to associate high agricultural production with the sustainable use of natural resources and the reduction of a possible environmental impact associated with the inadequate waste disposal, as they are generated in the mineral area. In this scenario, the biotechnological processes have proved to be efficient and extremely interesting from the environmental point of view, and can be an attractive and sustainable technological alternative for the production of phosphate fertilizers. In addition, several studies have indicated that world phosphorus reserves will be exhausted even in this century, which makes the search for new technologies essential.

Keywords

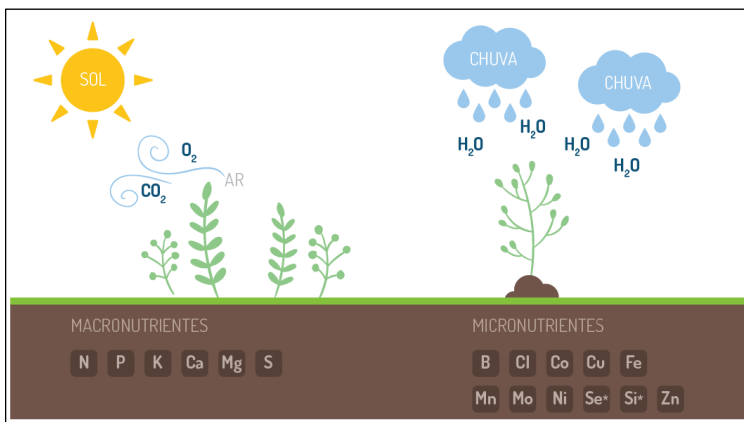
Phosphorus, biosolubilization, fertilizers, mining waste.

1 | INTRODUÇÃO

As plantas necessitam de elementos nutricionais em quantidades adequadas para seu crescimento e desenvolvimento. Esses nutrientes podem ser obtidos do solo através de suas raízes (IFA, 2016), portanto, o estado nutricional das mesmas é dependente principalmente da disponibilidade de nutrientes no ambiente onde foram cultivadas. Assim, um solo com composição mineral adequada fornecerá os elementos necessários para uma maior produtividade e, por conseguinte, alimentos de maior qualidade nutricional (KISSOON, JACOB e OTTE, 2011).

Dezessete elementos são considerados *nutrientes essenciais* para o crescimento vegetal, ou seja, a planta não é capaz de completar um ciclo de vida na ausência de algum deles, e nenhum outro elemento pode substituí-lo. Além dos elementos adquiridos pelo ar e pela água (C, O, e H), os elementos nutricionais essenciais para a totalidade das plantas superiores são conhecidos por *macro* e *micronutrientes* (Figura 1) (IFA 2014; 2016):

- **Macronutrientes** são os nutrientes requisitados em maiores quantidades. Os macronutrientes *primários* são o nitrogênio (NH_3 , NH_4^+ ou NO_3^-), fósforo (H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-}) e o potássio (K^+) e são geralmente adicionados ao solo na forma de fertilizantes comerciais. Os macronutrientes considerados *secundários*, mas não menos importantes, são o enxofre (SO_4^{2-}), o cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}) e são necessários em quantidades um pouco menores.
- **Micronutrientes** são os nutrientes exigidos em menores quantidades pelas plantas. Entre eles estão o manganês (Mn^{2+}), cobre (Cu^{2+} ou Cu^+), zinco (Zn^{2+}), cloro (Cl^-), ferro (Fe^{2+} ou Fe^{3+}), molibdênio (MoO_4^{2-}), boro (H_3BO_3 ou H_2BO_3^-) e níquel (Ni^{2+}).

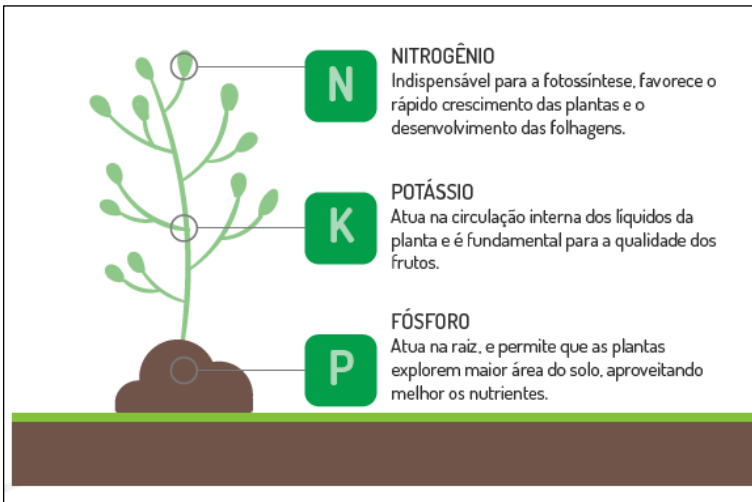


Fonte: ABISOLO, 2015.

Figura 1: Nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. *Elementos benéficos.

Os macronutrientes N, K e P são requeridos pelas plantas em quantidades relativamente grandes por desempenharem papéis fundamentais ao desenvolvimento das mesmas, conforme ilustrado na Figura 2. O **nitrogênio** como gás N_2 forma 78% da atmosfera da Terra e não é reativo. Deve ser convertido em formas químicas reativas (amônia e nitrato) para serem utilizadas pelas plantas. Essa conversão é feita por microrganismos naturalmente presentes no solo, especialmente por bactérias simbióticas ou por reações químicas. O **potássio** (K) existe em grandes quantidades nos minerais do solo e adsorvido na forma iônica K^+ às partículas do solo e à matéria orgânica. Ele entra nas raízes das plantas na forma iônica (K^+), muitas vezes pelo processo de osmose através das paredes celulares, sendo carregados por íons carregados negativamente. O potássio não forma nenhum composto químico nas plantas, mas desempenha um papel importante no transporte de água e outros íons através das membranas celulares. Já o **fósforo** (P) geralmente ocorre em grandes quantidades

nos minerais e na matéria orgânica do solo e deve ser convertido em íons de fosfato inorgânico (H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-}) para ser assimilado pelas plantas. O enxofre também é considerado hoje um elemento-chave para o desenvolvimento das plantas, intervindo na formação de compostos orgânicos (IFA 2014; 2016).

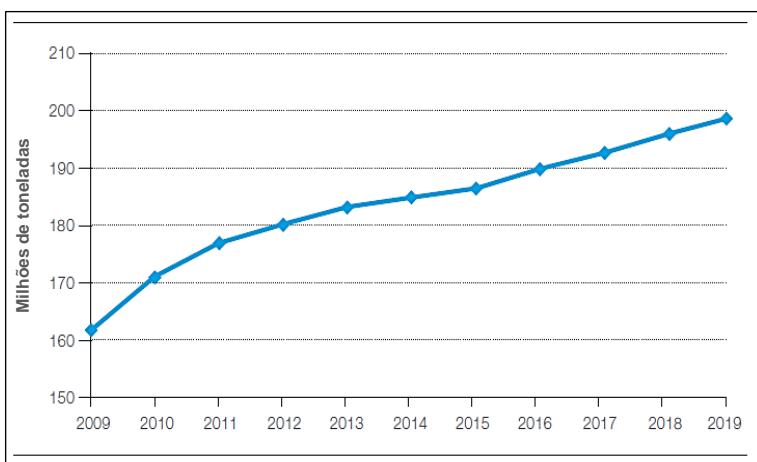


Fonte: ABISOLO, 2015.

Figura 2: Principais funções dos três macronutrientes essenciais.

Como nem sempre o solo contém os elementos nutricionais em quantidade essenciais para o crescimento vegetal, é recomendável a aplicação de nutrientes nas doses adequadas às exigências da planta a ser cultivada (SEKULA, 2011). Dada à importância dos macronutrientes NPK ao desenvolvimento das plantas, esses três elementos minerais precisam ser repostos com maior frequência no solo e, por isso, são encontrados na composição da maioria dos fertilizantes comerciais disponíveis.

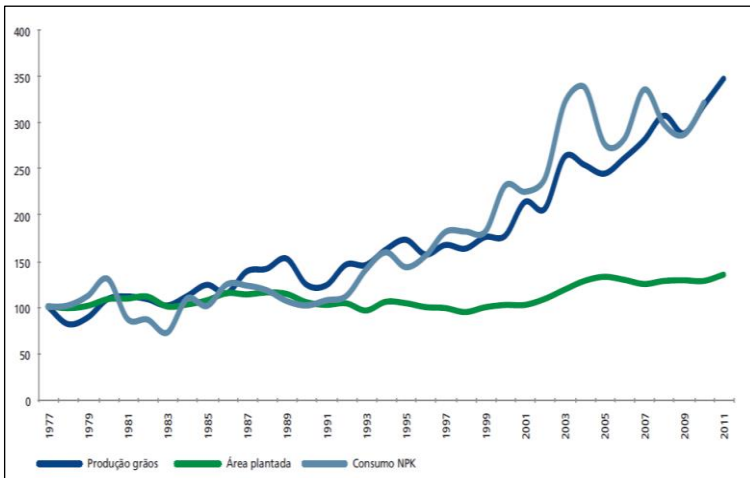
A adição de fertilizantes ao solo possibilitou o alto rendimento na produtividade agrícola mundial, acompanhando o crescimento populacional e, conseqüentemente, aumentando o desenvolvimento econômico rural (CHEN et al., 2018). Por esse motivo, o consumo mundial de fertilizantes NPK tem aumentado significativamente nos últimos anos (Figura 3), com estimativa de alcance de 199 milhões de toneladas ao final de 2019 (FAO, 2016).



Fonte: FAO, 2016.

Figura 3: Consumo global de nutrientes (somatório do consumo relativo aos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio - NPK).

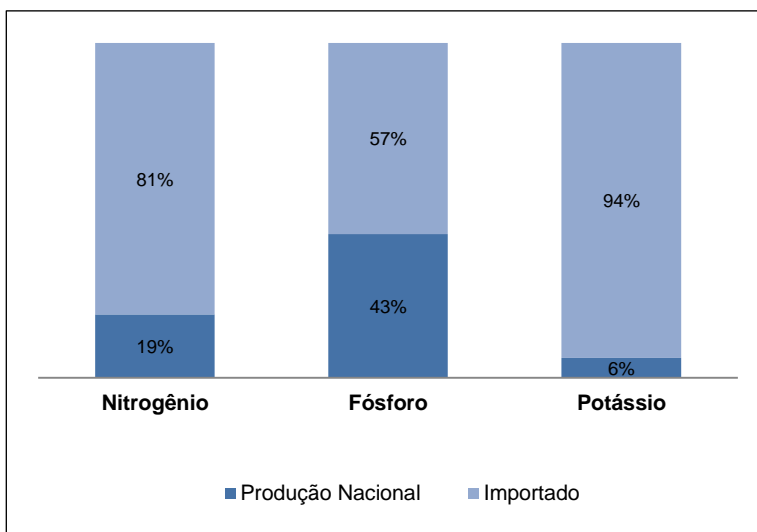
Levantamento elaborado pelo BNDES em 2012 (Figura 4) mostrou a relação do aumento da produção de grãos no Brasil com o aumento do consumo de fertilizantes NPK de 1977 a 2012. Essa relação “produção de grãos x área plantada x consumo NPK” comprova a importância da fertilização do solo no crescimento da produtividade agrícola brasileira ao longo dos anos.



Fonte: BNDES, 2012.

Figura 4: Produção de grãos, área plantada e consumo de NPK no Brasil (1977 = base 100).

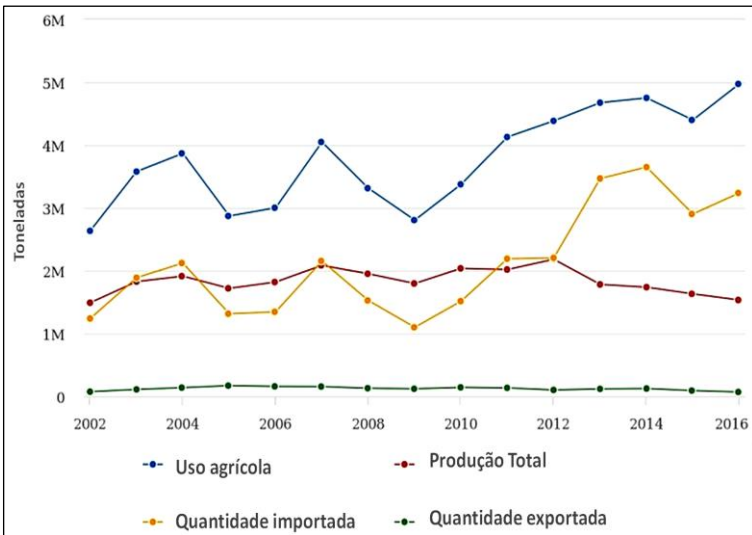
Em geral, o solo brasileiro é ácido e pobre em macronutrientes, o que torna o Brasil um grande usuário de fertilizantes. Apesar de ser o quarto maior consumidor, com 6% de participação mundial, o Brasil importa 79% dos fertilizantes NPK usados na agricultura (EMBRAPA, 2017; ANDA, 2011). A grande dependência de importação, apresentada na Figura 5, revela a insuficiente produção interna de insumos para fabricação de fertilizantes. Por isso, a busca de rotas alternativas e, preferencialmente, sustentáveis para obtenção desses elementos torna-se uma importante estratégia para o mercado brasileiro.



Fonte: ANDA, 2013.

Figura 5: Perfil da dependência externa de fertilizantes para a agricultura brasileira.

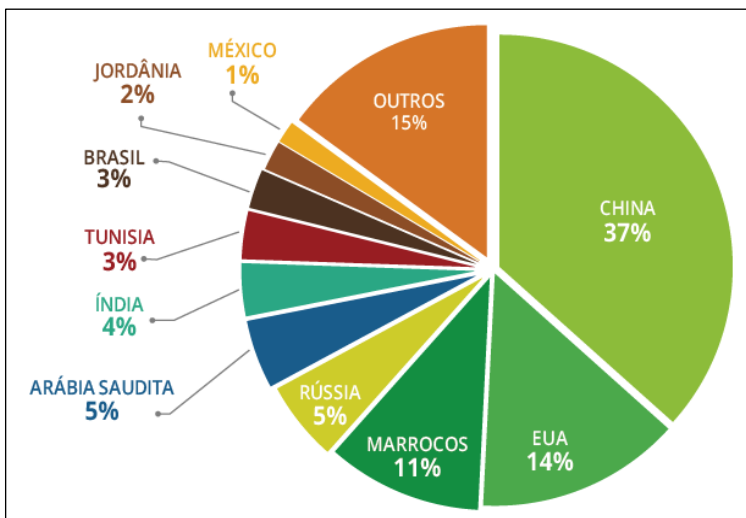
Apesar dos fertilizantes fosfatados exibirem uma situação mais favorável dos que os nitrogenados e os a base de potássio, sua produção nacional ainda é insuficiente para atender as necessidades internas do setor agrícola nacional (RICHETTI, 2018). Dados da FAO (2018) mostram que o uso e a importação do fosfato usado na agricultura brasileira cresceram ao longo dos últimos anos (2002-2016), enquanto não houve grande variação em sua produção, sendo insignificante a parcela exportada (Figura 6).



Fonte: FAOSTAT, 2018.

Figura 6: Perfil do P₂O₅ no Brasil entre 2002 e 2016.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal (ABISOLO, 2018), o Brasil produz apenas 3% dos fertilizantes fosfatados no mundo. Os principais países produtores são a China, Estados Unidos, Marrocos e Rússia, responsáveis por 67% do total produzido mundialmente (Figura 7).



Fonte: ABISOLO, 2018.

Figura 7: Principais países produtores de fertilizantes fosfatados.

Marrocos, Estados Unidos, Rússia, Arábia Saudita e Israel foram as principais origens das importações do país em 2017, responsáveis por 30%, 19%, 14%, 9% e 7%, respectivamente, do total importado (ABISOLO, 2018).

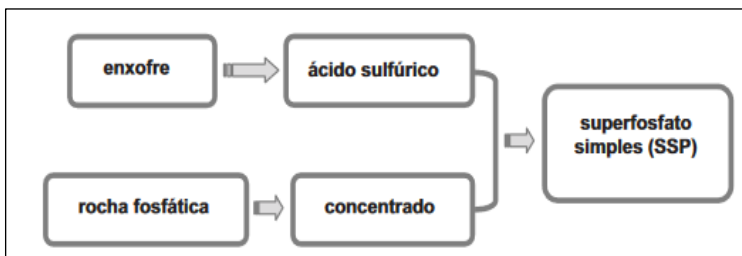
2 | FÓSFORO

A rocha fosfática é a única fonte de fósforo viável para uso agrícola, e por este motivo, não possui substituto. Estima-se que em 2021 o consumo mundial de P_2O_5 contido em fertilizantes e outros usos, sejam de 48,8 milhões de toneladas (1,1 milhões de toneladas a mais que em 2017). O uso agrícola no continente asiático e na América do Sul seria responsável por cerca de 70% desse aumento no consumo mundial (USGS 2018). Considerando-se que 90% do fósforo, oriundo de rocha fosfática, é usado na agricultura (BRUNNER, 2010) e que a população mundial vem crescendo 0,7% ao ano (UN, 2009), entende-se a crescente demanda mundial por fertilizantes fosfatados.

A maioria dos minerais de fósforo pertence ao grupo das apatitas. Sua mineralogia é bastante complexa, podendo ocorrer em praticamente todos os ambientes geológicos. A fórmula química genérica da apatita é: $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$ sendo denominada como, hidroxiapatita, cloroapatita ou fluorapatita dependendo do íon presente na estrutura. Por outro lado, a estrutura da apatita é muito tolerante a substituições, vacâncias e soluções sólidas, como por exemplo, os sítios Ca^{2+} podem ser ocupados por diferentes cátions, incluindo Sr^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , etc., assim como elementos de terras raras. Os íons Cl^- e OH^- podem ser substituídos por F^- e o P^{+5} pode ser parcialmente substituído por Si^{4+} , As^{5+} , S^{6+} , e C^{4+} . (PASERO et al. 2010; MERMAN, 2012).

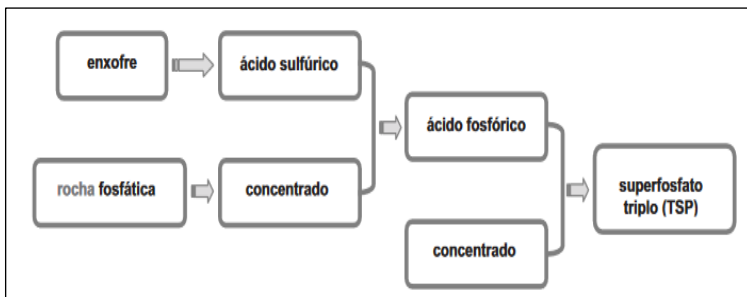
A produção de fertilizantes fosfatados (DIAS e LAJOLO, 2010) inicia-se pela extração do minério (lavra) das jazidas ricas em rochas fosfáticas. O minério lavrado é geralmente submetido a operações de beneficiamento, que abrangem estágios de cominuição e classificação, separação magnética, deslamagem e concentração por flotação, gerando o concentrado fosfático. Visando o aumento da solubilidade

do fósforo contido no concentrado, promove-se seu ataque por ácido sulfúrico e/ou fosfórico, obtendo-se os superfosfatos. O superfosfato simples (SSP) resulta do ataque por ácido sulfúrico (Figura 8). Diferentes proporções do concentrado fosfático e de ácido sulfúrico reagem formando ácido fosfórico. A reação entre o concentrado e o ácido fosfórico resulta no superfosfato triplo (TSP) (Figura 9). Já a reação da amônia com ácido fosfórico leva a produção de fosfato de monoamônio (MAP) e fosfato de diamônio (DAP) (Figura 10).



Fonte: DIAS e LAJOLO, 2010.

Figura 8: Esquema da produção do superfosfato simples (SSP).



Fonte: DIAS e LAJOLO, 2010.

Figura 9: Esquema da produção do superfosfato triplo (TSP).



Fonte: DIAS e LAJOLO, 2010.

Figura 10: Esquema da produção de fosfatos de amônio (MAP/DAP).

2.1 | Reservas Mundiais de Fósforo

Os depósitos contendo fósforo podem ser divididos em três grupos, de acordo com a origem geológica: sedimentar¹, ígnea² e biogênica³ (ALBUQUERQUE, 2010). As reservas mundiais de rocha fosfática, encontram-se em sua maioria em depósitos de origem sedimentar (cerca de 85% da oferta mundial) e normalmente com alto teor de P (> 20% P_2O_5), seguidas pela ígnea (~15%) e biogênica (<1%).

Relatório do United States Geological Survey (USGS, 2017), apontou que em 2016 os recursos mundiais de fosfato eram da ordem de 62 bilhões de toneladas. O norte do continente africano – Marrocos/Saara Ocidental - contém as maiores concentrações da rocha, com 80% das reservas mundiais (Tabela 1). China ocupa o segundo lugar com aproximadamente 5% seguido pela Argélia com 3,5%. Segundo o

¹ Rochas sedimentares são produtos da consolidação de sedimentos na superfície terrestre. As reservas mundiais de fosfato ocorrem principalmente em rochas sedimentares, com teores entre 25-33% de P_2O_5 , cujas características são a maior uniformidade e mineralogia mais simples.

² Rochas ígneas ou magmáticas são formadas pela cristalização de magmas provenientes do interior da Terra.

³ Rochas biogênicas são rochas sedimentares formadas por restos de seres vivos ou por substâncias provenientes da sua decomposição.

USGS, as reservas brasileiras são estimadas em 320 milhões de toneladas (dados de 2016) estando na décima segunda posição no *ranking* mundial das reservas de rocha fosfática e representando 0,5% do total global.

Tabela 1: Panorama das reservas mundiais de fosfato em bilhões de toneladas (ano-base 2016).

País	Reservas	País	Reservas
Marrocos e Saara Ocidental	50,000,000	Brasil	320,000
China	3,100,000	Cazaquistão	260,000
Argélia	2,200,000	Israel	130,000
Síria	1,800,000	Tunísia	100,000
África do Sul	1,500,000	Índia	65,000
Rússia	1,300,000	Senegal	50,000
Egito	1,200,000	México	30,000
Jordânia	1,200,000	Togo	30,000
Austrália	1,100,000	Vietnã	30,000
Estados Unidos	1,100,000	Outros países	810,000
Peru	820,000	Total mundial	62,000,000
Arábia Saudita	680,000		

Fonte: USGS, 2017.

Entretanto, apesar das reservas mundiais serem de ordem de bilhões de toneladas, diversos trabalhos têm indicado que as reservas mundiais de fósforo (rocha fosfática) se esgotarão ainda no século XXI. Segundo Cordell et al. (2009), em 2030 acontecerá o pico máximo de produção de P. No entanto, estima-se que em 30-40 anos (KUNTZ et al. 2010) ou em 2051-2092 (CORDELL et al. 2011), não haverá como atender a demanda mundial de rocha fosfática devido ao

esgotamento das reservas e aumento da população. Portanto, a busca por novos depósitos de fósforo é imprescindível para qualquer país, em associação ao aumento da eficiência do uso de fosforo na agricultura.

2.2 | Reservas Brasileiras

Distintamente do observado em outros países, as maiores reservas brasileiras de rochas fosfáticas ocorrem em rochas ígneas. Essas rochas apresentam teores médios de P_2O_5 variando entre 4% e 15%, possuem mineralogia mais complexa (visto que compreendem minério magmático primário e manto secundário enriquecido), com baixo grau de uniformidade, resultando em um aproveitamento industrial mais complexo e, conseqüentemente, mais custoso. Os depósitos ígneos brasileiros respondem por cerca de 80% da produção nacional de fosfato. Por este motivo, o preço médio brasileiro de fosfato é maior que o praticado no mundo (SOUZA et al., 2009).

Apenas 20% dos depósitos brasileiros são de origem sedimentar. A Tabela 2 destaca alguns desses depósitos. A título de exemplo, segundo Dardenne et al. (1986, 1997 *apud* ABRAM, 2016), o depósito de Rocinha apresenta uma reserva de 415 milhões de toneladas com 10 a 15% de P_2O_5 , enquanto que para Lagamar estima-se 5 milhões de toneladas com 30 a 35% de P_2O_5 .

Tabela 2: Dados econômicos dos depósitos sedimentares brasileiros.

Depósito	Localização	Volume (Mt)	Teor (%)
Rocinha	Minas Gerais (Brasil)	415	10 a 15
Lagamar	Minas Gerais (Brasil)	5	30 a 35
Arraias	Tocantins/Goiás (Brasil)	64,8	5,07
Bonfim	Tocantins (Brasil)	18	6
Irecê	Bahia (Brasil)	40	15 (primário) a 35 (supergênico)
Olinda/Igarassu	Pernambuco (Brasil)	96	18
Miriri	Paraíba (Brasil)	33	8,87
Lucena	Paraíba (Brasil)	55	6
Jaurú-Serra do Caeté	Mato Grosso (Brasil)	400	5

Fonte: ABRAM, 2016.

Os depósitos magmáticos brasileiros são depósitos importantes, alguns considerados como de classe mundial dentre os depósitos magmatogênicos. Destacam-se os depósitos de Tapira, Araxá, Catalão/Ouvidor I e II, Salitre I e II, Serra Negra, Cajati (Jacupiranga), Anitápolis e Ipanema. Abram (2016) reuniu os depósitos de fosfato magmatogênico brasileiros e os maiores depósitos mundiais (Tabela 3).

Tabela 3: Comparação entre os depósitos de fosfato magmatogênico brasileiros e os maiores depósitos mundiais.

Complexo	Localização	Volume (Mt)	Teor (%)
Khibina (Devon.)	Península de Kola	4000	15
Tapira (Cret.Sup.)	Alto Paranaíba (Brasil)	987	7
Kovdor (Devon.)	Península de Kola	700	7
Catalão I (Cret.Sup.)	Alto Paranaíba (Brasil)	600	10
Palabora (Prot.Inf.)	África do Sul	600	7
Araxá (Cret.Sup.)	Alto Paranaíba (Brasil)	560	15
Siilinjärvi	Finlândia	470	4
Sukulu	Uganda	230	13
Cajati (Jacupiranga)	São Paulo (Brasil)	90	6
Anitápolis	Santa Catarina (Brasil)	320	6,41
Maecuru	Pará (Brasil)	200	15
Serra Negra/Salitre	Minas Gerais (Brasil)	908	5 a 11
Ipanema	São Paulo (Brasil)	120	6,07
Juquiá	São Paulo (Brasil)	18	10
Angico dos Dias	Bahia (Brasil)	62,5	8 a 15,4
Santana	Pará (Brasil)	60,36	12,04
Três Estradas	Rio Grande do Sul (Brasil)	70,1	4,2
Mata da Corda	Minas Gerais (Brasil)	520	3,5

Fonte: ABRAM, 2016.

Segundo Fonseca (2016), em 2015 o Brasil produziu 6,1 milhões de toneladas de concentrado de rocha fosfática com teor de 35% de P_2O_5 . Cerca de 80% dessa produção está concentrada nos municípios de Tapira e Araxá, em Minas Gerais, e de Catalão e Ovidor, em Goiás.

Além das localidades acima citadas, completam a produção nacional os municípios de Cajati (SP), e Patos de Minas (MG), e de Lagamar (MG) e Angico dos Dias (BA).

A revista Minérios e Minerais lançou em 2017 um *ranking* com as 200 maiores minas brasileiras pelas suas produções anuais em toneladas de *Run of Mine* (ROM). Cinco minas de exploração de rocha fosfática entraram nesse *ranking*, a saber:

Mina Tapira

Atualmente, a Mina Tapira, localizada na cidade de Tapira/MG, é operada pela Mosaic Fertilizantes e constitui a maior mina em operação de mineração de rocha fosfática no Brasil. Com uma produção de 16,935,606 ROM (t) em 2015, a mina ficou na 13ª posição do ranking das 200 maiores minas do Brasil. Seu principal objetivo é a produção de concentrado fosfático com teor de 35,5% de P_2O_5 a partir do minério com teor de P_2O_5 da ordem de 7,8% (NICOLI, 2014).

Mina Catalão

Localizada em Catalão/GO, a mina Catalão ficou em segundo lugar na produção anual (t) de fosfato (6,097,021 t em 2015). A mina, também operada pela Mosaic Fertilizantes, ocupou a 21ª posição no ranking geral por produção anual em toneladas (ROM).

Mina Chapadão

A mina operada pela Copebrás/CMOC se encontra no município de Ouvidor/GO apresentou uma produção de 5,594 milhões de toneladas em 2017. Com um volume de movimentação de 16.600 milhões de toneladas (ROM + estéril), a mina foi a terceira maior mina em produção de rocha fosfática no Brasil e 23º maior mina em volume de produção.

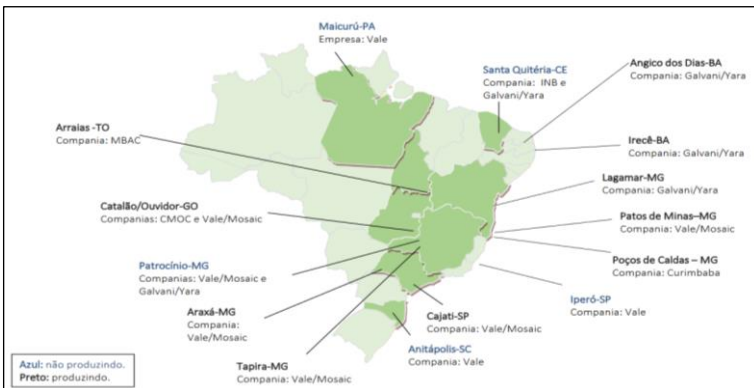
Mina Lagamar

A mineradora Galvani opera a mina Lagamar, no município de Lagamar/MG, com uma produção de 1.160.211(t) (ROM) em 2017. Foi considerada a quarta maior mina em produção de fosfato e a 76^o das 200 maiores minas do país.

Mina Angico dos Dias

A Mina Angico dos Dias, localizada em Campo Alegre de Lourdes/BA e operada pela Galvani, produziu 480.000 ROM (t) em 2017, ocupando o quinto lugar no ranking por substância e o 127^o lugar no ranking geral por produção.

Em trabalho recente, Cruz (2017) apresenta as principais autorizações de pesquisas e projetos de exploração de fosfato no país (Figura. 11). O estado de Minas Gerais contém o maior número de autorizações no Brasil, com cinco minas de exploração em atividade. Os estados de Goiás e Bahia apresentam duas minas em produção, seguido por São Paulo e Tocantins com uma mina.



Fonte: CRUZ, 2017.

Figura 11: Principais autorizações de pesquisa e projetos em fosfato no Brasil.

O autor também destaca algumas autorizações ainda sem produção em Minas Gerais, Pará, Santa Catarina, São Paulo e Ceará. Em Patrocínio/MG, por exemplo, o Complexo Minerioindustrial de Serra do Salitre, empreendimento da Galvani/Yara orçado em US\$ 500 milhões, terá uma unidade que irá produzir desde o minério até o fertilizante pronto. O complexo pretende produzir 1,2 milhões de toneladas/ano de rocha fosfática e 950 mil toneladas/ano de fertilizantes fosfatados.

Outro projeto ainda sem produção é o Consórcio Santa Quitéria. A associação de duas empresas (Indústrias Nucleares do Brasil - INB e o Grupo Galvani) para implantação do Projeto Santa Quitéria, prevê a instalação de um complexo industrial dedicado à mineração e beneficiamento de fosfato e urânio, minérios que se encontram associados em reserva localizada no município de Santa Quitéria, Ceará. Serão investidos R\$ 850 milhões na implantação do empreendimento que produzirá fertilizante fosfatado para a agricultura, fosfato bicálcico para alimentação animal e concentrado de urânio, destinado à produção de energia nas usinas nucleares brasileiras. O projeto estima uma produção de 800 mil toneladas/ano de rocha fosfática, 810 mil toneladas/ano de fertilizantes granulados, 240 mil toneladas/ano de fosfato bicálcico para nutrição animal. Além de uma produção de 1,600 mil toneladas/ano de concentrado de urânio. O projeto ainda espera permitir uma redução de 50% nas importações de fosfatados e quadruplicar a atual capacidade de produção de concentrado de urânio.

2.3 | Resíduos Sólidos Gerados na Atividade de Mineração

O setor mineral tem grande influência na economia do Brasil, respondendo por 4,2% do PIB brasileiro (IBRAM, 2017) e 16,7% do PIB industrial (IBRAM, 2018). Representa 30% do saldo da balança

comercial: são US\$ 28,3 bilhões em exportações e mais de 400 milhões de toneladas movimentadas nos portos brasileiros. Além disso, o setor ocupa uma área de 0,5% de todo território nacional com um volume de produção de mais de 2 bilhões ton/ano (IBRAM, 2018).

Sabe-se que a atividade de mineração gera grandes volumes de resíduos sólidos. Existem dois tipos principais de resíduos sólidos: os *estéreis* e os *rejeitos* (IPEA, 2012). Os **estéreis** são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Os **rejeitos** são resíduos oriundos dos processos de beneficiamento das substâncias minerais. Existem ainda outros resíduos, como efluentes gerados nas plantas de mineração, carcaças de baterias e pneus utilizados pela frota de veículos, provenientes da operação das plantas de extração e de beneficiamento das substâncias minerais.

A quantidade desses resíduos é extremamente difícil de mensurar, devido principalmente à diversidade das operações e das tecnologias utilizadas nos processos de extração e beneficiamento das substâncias minerais. Além disso, as informações se encontram dispersas e não existe um controle sobre a quantidade dos *resíduos estéreis* gerados pela atividade de mineração (IPEA, 2012). O estado de Minas Gerais, por exemplo, elaborou inventários da geração de resíduos sólidos das atividades minerárias. Sabe-se que os *estéreis* constituem entre 70% e 80% da massa de resíduos sólidos gerada pela atividade de mineração no estado (MMA, 2012).

Tendo em vista a dificuldade de obtenção de dados, os valores aqui relatados serão definidos com base nos *rejeitos* gerados no beneficiamento do minério.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2012) e o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) reuniram os valores quantitativos dos *rejeitos* produzidos das 14 principais substâncias exploradas na atividade de mineração, a saber: ferro, ouro, titânio, fosfato, estanho, zircônio, calcário, alumínio, cobre, níquel, nióbio, caulim, zinco e manganês. Estes relatórios apresentam as quantidades geradas entre 1996-2005 e suas estimativas de 2010-2030. Neste trabalho serão apresentados os resultados de todas as substâncias minerais analisadas pelo relatório. Contudo, será dada ênfase aos valores referentes aos *rejeitos de fosfato*.

A geração de rejeitos no período de 1996-2005 foi de aproximadamente 2,2 bilhões de toneladas tendo a mineração de fosfato contribuído com 11,33% desse montante. A atividade que maior produziu rejeitos é a mineração do ferro com 35,08% de representação nesse período (Tabela 4).

A Tabela 4 também expõe as projeções de geração de rejeitos da mineração de 2010-2030. Estima-se que a quantidade de rejeitos gerados nesse período será de 11,4 bilhões de toneladas. A maior produtora de rejeitos ainda será a mineração de ferro (41,38%), entretanto, o fosfato passa a ocupar o segundo lugar, com quase 10% de participação.

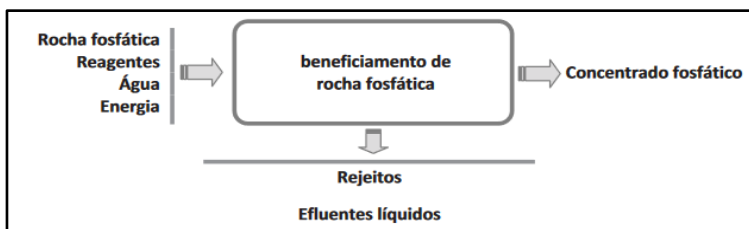
Tabela 4: Quantidade total de rejeitos gerados e contribuição percentual média de cada substância no decênio 1996-2005 e no período de 2010-2030 (projeção).

Substância	Quantidade total de rejeitos (1.000 t)		Contribuição (%) média de cada minério no total de rejeitos	
	1996-2005	2010-2030	1996-2005	2010-2030
Ferro	765.977	4.721.301	35,08	41,38
Ouro	295.295	1.111.320	13,82	9,74
Titânio	276.224	1.018.668	12,55	8,93
Fosfato/Rocha Fosfática	244.456	1.128.198	11,33	9,89
Estanho	149.369	357.952	6,79	3,14
Zircônio	116.236	490.183	5,39	4,30
Calcário	89,398	341,045	4,29	2,99
Alumínio (Bauxita)	69.783	493.925	3,16	4,33
Cobre	53.498	819.636	2,25	7,18
Nióbio	35.690	119.372	1,53	1,05
Níquel	35.076	637.380	1,61	5,59
Caulim	24.346	90.729	1,09	0,80
Manganês	12.064	36.071	0,74	0,32
Zinco	12.562	44.097	0,57	0,39
Total	2.179.975	11.409.877	100,00	100,00

Fonte: MMA e IPEA, 2012.

Dias e Lajolo (2010) dedicaram um capítulo do livro “Agrominerais para o Brasil” (FERNANDES, LUZ e CASTILHOS, 2010) na identificação e análise dos impactos ambientais causados pela

produção de fertilizantes fosfatados no Brasil. Além da alteração da paisagem local, que acarreta a perda da biodiversidade e poluição das águas na etapa de lavra, o beneficiamento da rocha fosfática para obtenção de concentrados fosfáticos utilizados como fertilizantes, também traz impactos negativos ao meio ambiente. Essa etapa requer alto consumo de energia e água; é gerador de efluentes líquidos que podem conter resíduos dos vários tipos de reagentes utilizados no processo, sendo também grande produtor de rejeitos e lamas (Figura 12).



Fonte: DIAS e LAJOLO, 2010.

Figura 12: Esquema simplificado do processo de beneficiamento de rocha fosfática.

Um procedimento amplamente utilizado no Brasil para destinação da grande maioria dos rejeitos produzidos no beneficiamento de minério fosfatado é a disposição desse material em barragens de rejeitos. Contudo, nos últimos anos, após inúmeros acidentes causados por rupturas de barragens e pilhas de rejeitos, maior atenção tem sido dada a esse processo, exigindo das empresas políticas concretas de controle dos impactos da atividade mineradora sobre o meio ambiente (SOBRINHO, 2014).

Silverol e colaboradores (2015) relataram que grande quantidade de rejeitos gerados no processo de lavra e de beneficiamento da rocha fosfática ainda é portadora de fosfato. Um exemplo é o processamento da rocha fosfática em Catalão/GO (SILVA et al., 2015). São gerados

aproximadamente, 180 t/h de rejeitos de 480 t/h alimentadas na usina (aproximadamente 37,5% da alimentação da usina), com 5 a 10% de sólidos e, aproximadamente, 14% de P_2O_5 .

Em Tapira (MG), a principal mina de extração de fosfato existente no Brasil, acredita-se que para cada 1,6 milhão de t/ano de concentrado de fosfato sejam gerados 9 milhões t/ano de rejeitos e lamas (DIAS e LAJOLO, 2010). Os produtos da usina constituem-se, em média, por 14% de concentrado fosfático que é utilizado para produção de fertilizantes, 15% de rejeito magnético, 20% de lamas e 51% de rejeitos de flotação. Os rejeitos de flotação são direcionados em forma de polpa para a barragem de rejeitos (CETEM, 2002 *apud* NICOLI, 2014).

O minério lavrado na Mina Chapadão conforma pilhas com teor médio de 12,5% de P_2O_5 , que é direcionado para as usinas de beneficiamento para uma concentração de 37% de P_2O_5 . Para a obtenção de um produto final nesta concentração, rejeitos são gerados na proporção de 35% de rejeitos magnéticos, 30% rejeitos de flotação e 12 % de lamas. Todos estes rejeitos são dispostos em uma barragem de rejeitos (NICOLI, 2014).

No processo de beneficiamento industrial do minério fosfático na mina de Araxá, também são gerados três diferentes tipos de rejeitos: lamas, rejeitos de flotação e rejeitos magnéticos, todos eles direcionados, em forma de polpa, para barragem de rejeitos (BITTAR, 2006; NICOLI, 2014).

Considerando-se o iminente esgotamento das jazidas de rocha fosfática no mundo e a grande geração de rejeitos gerados na produção de fertilizantes fosfatados, torna-se de extrema importância a busca por novas tecnologias sustentáveis que sejam capazes aproveitar essa fonte secundária de fósforo e, assim, contribuir para suprir as necessidades futuras desse fertilizante.

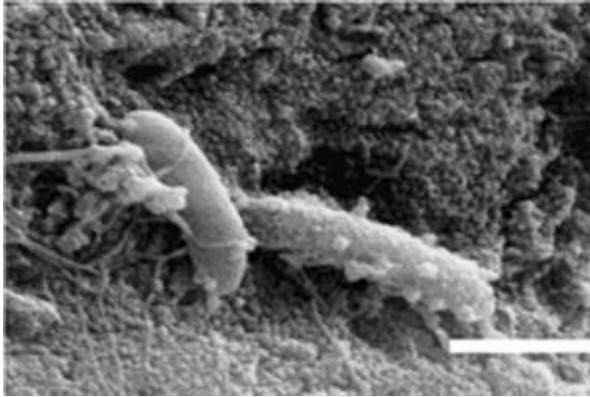
3 | BIOPROCESSOS APLICADOS NA OBTENÇÃO DE FÓSFORO

Os microrganismos desempenham papel fundamental na disponibilidade de nutrientes ao solo, contribuindo para o aumento da fertilidade e, conseqüentemente, para a nutrição vegetal. Bactérias e fungos presentes naturalmente no solo contribuem para liberação de macor e micronutrientes minerais que são requeridos não só para suas próprias necessidades nutricionais, mas, também, para as plantas (UROZ et al. 2009; GAAD, 2010).

Muitas rochas e minerais contêm nutrientes essenciais para o crescimento microbiano (UROZ et al., 2009). Em ambientes da superfície terrestre onde o oxigênio é abundante, microrganismos aeróbicos interagem com minerais na forma de óxidos e/ou silicatos para obter nutrientes essenciais e também para usá-los como proteção contra habitats nocivos à sua sobrevivência. A produção de substâncias poliméricas extracelulares (SPE) e outros ligantes (como os sideróforos) os ajudam a se fixar na superfície das rochas e dissolver (biossolubilizar) os minerais como forma de extrair os nutrientes de interesse. Já nas condições de subsuperfície, onde o oxigênio se torna limitado, microrganismos anaeróbicos prosperam ao utilizar formas oxidadas de metais em substituição ao oxigênio, com a conseqüente dissolução dos minerais e precipitação de substâncias metálicas, tais como aquelas na forma de sulfetos insolúveis. Em qualquer um dos processos mencionados, os microrganismos possuem como objetivo principal a obtenção de energia para manutenção da atividade metabólica e, também, para a multiplicação e para o crescimento celular (DONG, 2010).

Minerais contendo fósforo apresentam baixa solubilidade e, por esse motivo, frequentemente esse elemento possui biodisponibilidade limitada em ambientes naturais. Assim, sabe-se que os microrganismos

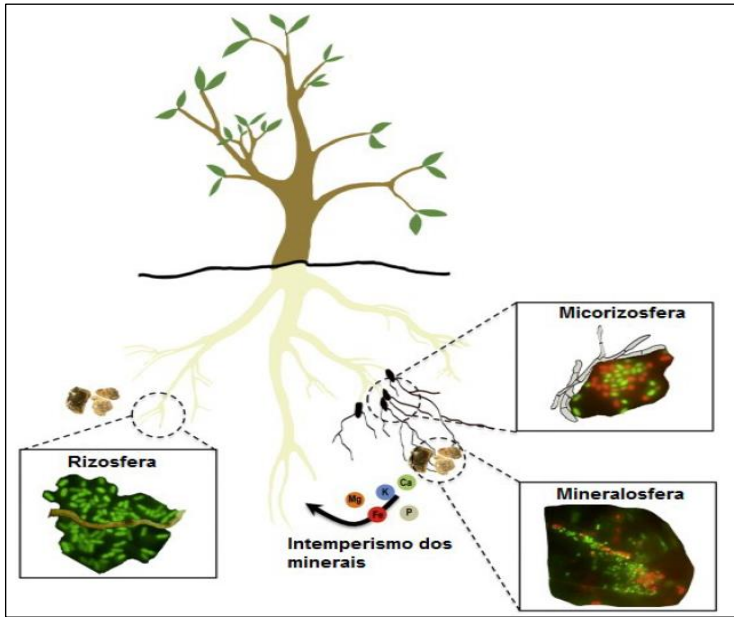
frequentemente colonizam as superfícies minerais e rochosas que contêm fósforo, principalmente apatita, olivina, feldspatos, vidro e basalto (Figura 13) como forma de contornar a dificuldade de acesso a este macronutriente e propiciar seu crescimento (DONG, 2010).



Fonte: ROBERTS et al., 2004 *apud* DONG, 2010.

Figura 13: Fotomicrografia realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de células em forma de bastonete na superfície de basalto com precipitação de dolomita ferroana nas superfícies celulares após três meses em água subterrânea (ambiente anaeróbio). A barra de escala é de 0,5 mm.

Os microrganismos são capazes de colonizar a superfície e, muitas vezes, o interior do mineral e usar mecanismos como a produção de ácidos orgânicos, substâncias poliméricas extracelulares (SPE) e ligantes de complexação de metais, alterando as condições de oxiredução (redox), ou mediando a formação de fases minerais secundárias para promover o intemperismo mineral (UROZ et al. 2009). A intensificação do intemperismo mineral na rizosfera dos solos, por exemplo, pode também ser atribuída, em parte, às comunidades fúngicas e bacterianas associadas às raízes (Figura 14).



Fonte: Adaptado de UROZ et al., 2009.

Figura 14: Envolvimento de microrganismos do solo no ciclo de nutrientes e na nutrição das plantas.

A ciclagem de nutrientes nos ecossistemas florestais é fortemente influenciada pelos microrganismos do solo, presentes em diferentes nichos: a rizosfera (solo que envolve as raízes não micorrízicas), a micorrizosfera (solo que envolve as raízes micorrízicas) e as superfícies minerais (mineralosfera). As raízes de plantas, as bactérias e os fungos afetam a estabilidade de partículas minerais, levando à liberação de nutrientes inorgânicos. Esta dissolução modifica localmente as propriedades físico-químicas do solo e influencia a nutrição e, conseqüentemente, as atividades fisiológicas de bactérias, fungos e plantas.

Levando em consideração os mecanismos biogeoquímicos previamente conhecidos e envolvidos no intemperismo dos minerais do solo, alguns trabalhos têm estudado a ação biológica *in vitro* na lixiviação de fósforo em rochas (GHOSH et al., 2016; BHATTI e YAWAR, 2010; PRIHA et al., 2014). Vale acrescentar, que a comunidade microbiana é diretamente afetada pelo tipo de solo e de minerais presentes, principalmente pelas diferentes composições dos elementos nutricionais dos minérios. Essa estrutura complexa tem sido chamada de mineralosfera (UROZ et al., 2009, 2015). Devido a isso, os autores têm dado preferência por, primeiramente, isolar os microrganismos do local/mineral de interesse para dar início aos estudos.

Ghosh et al. (2016) isolaram três potentes estirpes bacterianas solubilizadoras de fosfato da raiz de *Lycopodium cernuum* L. Segundo os autores, essa planta foi encontrada em solo laterítico vermelho deficiente em fosfato no estado de Bangala Ocidental na Índia. As espécies isoladas *Burkholderia tropica* P4, *Burkholderia unamae* P9 e *Burkholderia cepacia* P10 foram capazes de solubilizar o fósforo em todas as diferentes fontes estudadas (fosfato tricálcico e quatro rochas fosfáticas – denominadas de JRP, PRP, URP e MRP). A biossolubilização de fosfatos de rocha é um processo complexo devido à alta presença de minerais acessórios e sua natureza complexa que dificultam a solubilização, por isso, neste trabalho, as estirpes solubilizaram valores maiores de P no meio quando utilizado o fosfato tricálcico. Para a fonte sintética de P, foram alcançados 580,7 mg/L, 517,1 mg/L e 485,2 mg/L de P em 3, 3 e 4 dias para P4, P9 e P10, respectivamente. Dentre as fontes rochosas, JRP sofreu maior extração tendo 514,8 mg/L de P solubilizado no meio após 2 dias de cinética pela estirpe P4. 464,1 e 416,4 mg/L de P foram solubilizados por P9 e P10 em 3 dias, respectivamente. Os autores também destacaram a queda do pH inicial (7,0) do meio de cultivo para valores de pH ácido

(pH 3,0-4,0). De acordo com os mesmos, um dos mecanismos mais importantes para a biossolubilização de fosfato por PSB (Bactérias Solubilizadoras de Fosfato) é o baixo pH. A redução do pH estaria relacionado a secreção de ácidos orgânicos como os ácidos glucônico e 2-cetoglucônico, que quelam os cátions metálicos dos fosfatos insolúveis. Assim, a cinética de solubilização típica de fosfato inclui uma diminuição gradual do pH juntamente com o aumento da concentração de fosfato solúvel ao longo do tempo.

Bactérias acidófilas também têm sido estudadas na biolixiviação de rochas fosfáticas. Estas bactérias oxidam enxofre elementar, compostos reduzidos de enxofre e minerais sulfetos para produzir ácido sulfúrico e sulfatos metálicos solúveis, criando assim um ambiente de lixiviação ácida (BHATTI e, 2010). Priha et al. (2014) trabalharam com dois minérios de YAWAR fluorapatita, um contendo alta (29,8%) e outro com baixa (8,2%) concentração de P_2O_5 . Os autores conseguiram uma recuperação de 97% de P do minério de baixa concentração, correspondendo a 600 mg/L, após 21 dias de processo quando trabalharam com concórcio microbiano (*Acidithiobacillus thiooxidans* + *Acidithiobacillus ferrooxidans* + *Leptospirillum ferrooxidans*). O máximo de extração do minério de alta concentração de P foi de 28% (640 mg/L), também em 21 dias, a partir de um mix de culturas acidófilas (*A. ferrooxidans* + *A. thiooxidans* + *A. caldus* + *L. ferrooxidans* + *Sulfobacillus thermotolerans*) oriunda de água ácida de mina.

Tendo em vista os resultados extremamente favoráveis apresentados no desenvolvimento de processos biotecnológicos para a solubilização de rochas fosfáticas, a recuperação de fósforo por rota biológica, a partir de rejeitos gerados na mineração dest etipo de rocha, pode ser encarada como uma alternativa atrativa e sustentável para produção de fertilizantes fosfatados. Contudo, deve se ater a composição dos

rejeitos e a possível presença de contaminantes que podem vir a agir como interferentes, diminuindo ou mesmo, impedindo o desenvolvimento e a atividade microbiana.

Em alinhamento com a possibilidade de uso de rejeitos da mineração de rochas fosfáticas como fonte de alternativa de fósforo, cabe registrar que a produção de fertilizantes considerados *ecofriendly* tem ganhado espaço devido à preocupação com a agricultura sustentável (BHARDWAJ et al., 2014; PARMAR; SINDHU, 2013). A aplicação de pó de rocha em solo agrícola, processo conhecido como rochagem, combinada com microrganismos previamente isolados, parece ser uma prática efetiva na solubilização de agrominerais (ANAND; KUMARI; MALLICK, 2016; ATTAR, 2018; XIAO et al., 2017). Devido à baixa solubilidade das rochas silicáticas e à demanda de grandes quantidades de pó de rocha para o solo (BOLLAND; BAKER, 2000; HARLEY; GILKES, 2000), essa mistura aumentaria a disponibilidade de nutrientes para a absorção das plantas e poderia aumentar a produtividade das culturas. No entanto, esta tecnologia dependerá das regulamentações ambientais de cada país. No Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é o órgão do Governo Federal responsável por regulamentar a aplicação desses produtos em terras agrícolas, e várias regras devem ser seguidas para normatização dessa prática. Além disso, ainda não se conhece o impacto dessa atividade ao longo dos anos, carecendo de desenvolvimento de estudos aprofundados sobre o tema. Uma alternativa a essa prática poderia ser o uso desses microrganismos como solubilizantes de minerais em processos industriais controlados. O P solúvel extraído de rochas ou rejeitos pelos microrganismos poderia ser empregado como matéria-prima para produção de fertilizantes solúveis, apresentando grande potencial de aplicação na agricultura brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABISOLO - Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal 2015. Anuário Abisolo, 124 p. 2015.

ABISOLO - Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal 2018. Anuário Abisolo, 179 p. 2018.

ABRAM, M.B. Fosfato no Brasil. In: MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U.G. (Org.) Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 96-115.

ABRAM, M.B.; BAHIANSE, I.C.; PORTO, C.G.; BRITO, R.S.C. Projeto Fosfato Brasil – Parte I. Informe de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais para a Agricultura, v.1, 524 p. 2011.

ALBUQUERQUE, R.O. Alternativas de processo para concentração do minério fósforo-uranífero de Itataia. 2010. 214f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ANAND, K.; KUMARI, B.; MALLICK, M.A. Phosphate solubilizing microbes: An effective and alternative approach as biofertilizers. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, v. 8, p. 37-40, 2016.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. Anuário estatístico do setor de fertilizantes, São Paulo, 2013.

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. Investimentos no Brasil. p. 1-32, 2011.

ATTAR, A. Effects of *Azorhizophilus paspali* and *Paenibacillus mucilaginosus* as biofertilizer and determination of nutritional efficiency by sensors. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 43, p. 3477-3484, 2018.

BABALOLA O.O.; GLICK B.R. The use of microbial inoculants in African agriculture: current practice and future prospects. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, v.10, p. 540-549, 2012.

BHARDWAJ, D.; ANSARI, M.W.; SAHOO, R.K.; TUTEJA, N. Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, v. 13, p. 1-10, 2014.

BHATTI, T.M.; YAWAR, W. Bacterial solubilization of phosphorus from phosphate rock containing sulfur-mud. *Hydrometallurgy*, v. 103, p. 54-59, 2010.

BOLLAND, M.D.A.; BAKER, M.J. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 56, p. 59-68, 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – Governo Federal. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. MMA Publicações, 2012.

BRUNNER, P.H. Substance flow analysis as a decision support tool for phosphorus management. *Journal of Industrial Ecology*, v. 14, p. 870-873, 2010.

CHEN, J.; LÜ, S.; ZHANG, Z.; ZHAO, X.; LI, X.; NING, P.; LIU, M. Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of the Total Environment*, v. 613-614, p. 829-839, 2018.

CONCÓRCIO Santa Quitéria. Disponível em: <http://www.consorcio-santaquiteria.com.br/projeto.php>. Acesso em: out. 2018.

CORDELL, D.; DRANGERT, J.O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, v. 19, p. 292-305, 2009.

CORDELL, D.; WHITE, S.; LINDSTRÖM, T. Peak phosphorus: the crunch time for humanity? *The Sustainability Review*, v. 2, 2011. Disponível em: <http://www.thesustainabilityreview.org/2011/04/peak-phosphorus-the-runch-time-for-humanity/>. Acesso em: nov. 2018.

COSTA, L.M.; SILVA, M.F.O. A indústria química e o setor de fertilizantes. BNDES Biblioteca Digital, 2012.

CRUZ, V.H.L. Indústria Mineral Brasileira: o Agronegócio e os Fertilizantes. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2017. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-ermanentes/cme/audiencias-publicas/2017/debater-exploracao-de-jazidas-de-fosforo-e-potassio-no-brasil/1.%20Vicente%20Humberto%20Lobo.pdf>>. Acesso em: set. 2018.

DIAS, E.G.; LAJOLO, R.D. O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil. In: FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. Agrominerais para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 105-124.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Fosfato. Sumário Mineral, v. 36, 2016.

DONG, H. Mineral-microbe interactions: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, v. 4, p. 127–147, 2010.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dependência externa de fertilizantes NPK é debatida em Audiência Pública. *Embrapa Notícias*, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/30098853/dependencia-externa-de-fertilizantes-npk-e-debati-da-em-audiencia-publica>>. Acesso em: set. 2018.

FAO. Food and Agriculture Organization of United Nations. World fertilizer trends and outlook to 2019. Summary Report. FAO, Roma, 2016.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of United Nations. 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#compare>. Acesso em: jul. 2018.

GADD, G.M. Metals, minerals and microbes: Geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, v. 156, p. 609-643, 2010.

GALVANI Projeto Serra do Salitre. Disponível em: <https://www.projeto-serradosalitre.com.br/o-projeto>. Acesso em: out. 2018.

GHOSH, R.; BARMAN, S.; MUKHERJEE, R.; MANDAL, N.C. Role of phosphate solubilizing *Burkholderia* spp. for successful colonization and growth promotion of *Lycopodium cernuum* L. (Lycopodiaceae) in lateritic belt of Birbhum district of West Bengal, India. *Microbiological Research*, v. 183, p. 80-91, 2016.

HARLEY, A.D.; GILKES, R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 56, p. 11-36, 2000.

HUANG, T.; GONG, W.Q.; BAO, G.M.; LEI, S.M. Bioleaching of phosphorus from hematite with mixed bacteria. *Advanced Materials Research*, v. 823, p. 613-617, 2013.

IBRAM. Economia Mineral do Brasil - Setembro/2018, 2018. Disponível em: <<http://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2018/08/economia-mineral-brasil-set2018.pdf>>. Acesso em: out. 2018.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas - Relatório de Pesquisa. IPEA, p. 1-46, 2012.

KISSOON, L.T.T.; JACOB, D.L.; OTTE, M.L. Multiple elements in *Typha angustifolia* rhizosphere and plants: Wetland versus dryland. *Environmental and Experimental Botany*, v. 72, p. 232-241, 2011.

KUMAR, S.; BAUDDH, K.; BARMAN, S.C.; SINGH, R.P. Amendments of microbial bio fertilizers and organic substances reduces requirement of urea and DAP with enhanced nutrient availability and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecological Engineering*, v. 71, p. 432-437, 2014.

KUNTZ, T. Peak Phosphorus. *The New York Times*, New York, 27 apr. 2010. Disponível em: <http://ideas.blogs.nytimes.com/2010/04/27/peak-phosphorus/>>. Acesso em: nov. 2018.

MERMA, A.G. Aspectos fundamentais da bioflotação do sistema apatita quartzo usando a bactéria *Rhodococcus opacus* como biorreagente. 2012. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

MINÉRIOS E MINERALES. 200 Maiores Minas Brasileiras. Minérios & Minerales, 2017.

NICOLI, T.A. Proposição de uma nova sistemática de disposição dos rejeitos magnéticos provenientes do beneficiamento da rocha fosfática na mina chapadão, Catalão/GO. 2014. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

PARMAR, P.; SINDHU, S.S. Potassium solubilization by rhizosphere bacteria: influence of nutritional and environmental conditions. *Journal of Microbiology Research*, v. 3, p. 25-31, 2013.

PASERO, M.; KAMPF, A.R.; FERRARIS, C.; PEKOV, I.V.; RAKOVAN, J.; WHITE, T.J. Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *European Journal of Mineralogy*, v. 22, p. 163-179, 2010.

POSTMA, J.; NIJHUIS, E.H.; SOMEUS, E. Selection of phosphorus solubilizing bacteria with biocontrol potential for growth in phosphorus rich animal bone charcoal. *Applied Soil Ecology*, v. 46, 464-469, 2010.

PRIHA, O. SARLIN, T.; BLOMBERG, P.; WENDLING, L.; MÄKINEN, J.; ARNOLD, M.; KINNUNEN, P. Bioleaching phosphorus from fluorapatites with acidophilic bacteria. *Hydrometallurgy*, v. 150, p. 269-275, 2014.

REETZ, H.F.J. Fertilizers and their efficient use. *International Fertilizer Industry Association (IFA)*, França, 2016.

RICHETTI, P. Tendências da produção de fertilizantes no Brasil. *Notícias Agrícolas*, 2018. Disponível em: <<https://www.noticiasagricolas.com.br/artigos/artigos-principais/221636-tendencias-da-producao-de-fertilizantes-no-brasil-por-priscila-richetti.html#.W6TztSBv-Uk>>. Acesso em: out. 2018.

SÉKULA, C.R. Características químicas do solo e produção de grandes culturas com rochagem e biofertilizantes. 2011. 61f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2011.

SILVA, A.C.; SILVA, E.M.S.; JUNIOR, A.P.S.; ARRUDA, J.P.A.; VAZ, V.R.A. Mineral paste production from phosphate rock tailings. *Mineração*, v. 68, p. 103-108, 2015.

SILVEROL, A.C.; TOLEDO, M.C.M.; SILVA, W.T.L.; CONDRON, L. Caracterização da transformação do fósforo no processo humifert: fracionamento sequencial, difração de raios X e espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier. *Geochimica Brasilienseis*, v. 29, p. 87-99, 2015.

SOBRINHO, A.R.V.G. Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido: Estudo de caso. 2014. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

UN – United Nations. *World Population Prospects: The 2017 revision*. United Nations: Nova York, 2017.

UROZ, S.; KELLY, L.C.; TURPAULT, M.-P.; LEPLEUX, C.; FREY-KLETT, P. The mineralosphere concept: mineralogical control of the distribution and function of mineral-associated bacterial communities. *Trends in Microbiology*, v. 23, p. 1-12, 2015.

UROZ, S.; CALVARUSO, C.; TURPAULT, M.P.; FREY-KLETT, P. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends in Microbiology*, v. 17, p. 378-387, 2009.

USGS - United States Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2017*. U.S. Geological Survey, 202 p., 2017.

USGS - United States Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2018*. U.S. Geological Survey, 200 p., 2018.

XIAO, Y.; WANG, X.; CHEN, W.; HUANG, Q. Isolation and identification of three potassium-solubilizing bacteria from rape rhizospheric soil and their effects on ryegrass. *Geomicrobiology Journal*, v. 34, p. 873-880, 2017.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2018, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 340 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Mineral

STM- 101 – Modelagem do processo de extração por solvente de elementos terras-raras com extratantes organofosforados. Luciana Amaral Seruff e Ysrael Marrero Vera, 2018.

STM-100 – Análise fluidodinâmica das colunas piloto de flotação do CETEM por meio de distribuição de tempos de resistência – DTR. Hudson Jean Bianchini Couto, Renata Nigri de Almeida, Raphael Andrade Eloi de Oliveira e Paulo Fernando Almeida Braga, 2018.

STM-99 – Revisão de alguns principais métodos utilizados em Modelagem Molecular – PARTE II – MÉTODOS QUÂNTICOS. Kelly Fernandes Pessôa, Julio Cesar Guedes Correia, Alexandre Nelson Martiniano Carauta e Fernanda Barbosa da Silva, 2018.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3865-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 41 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.