

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS CERRO LARGO**  
**PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM DESENVOLVIMENTO RURAL**  
**SUSTENTÁVEL E AGRICULTURA FAMILIAR**

**SERGIO FRANCISCON**

**Microrganismos:**  
**Alternativas para a solubilização de fosfatos na**  
**agricultura**

Cerro Largo – RS, Julho de 2013

**SERGIO FRANCISCON**  
**AUTOR DO TRABALHO**

**Microrganismos:**  
**Alternativas para a solubilização de fosfatos na**  
**agricultura**

Monografia apresentada ao  
Curso de Pós-Graduação *Lato*  
*Sensu* em Desenvolvimento  
Rural Sustentável e Agricultura  
Familiar da Universidade  
Federal da Fronteira Sul –  
UFFS, Campus Cerro Largo.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

Co-orientador: Prof. Dr. Daniel Daroit

SERGIO FRANCISCON

Microorganismos:

Alternativas para a solubilização de fosfatos na agricultura

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em  
Desenvolvimento Rural Sustentável e Agricultura Familiar da  
Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, Campus Cerro Largo

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

.....  
Prof. Dr. Daniel Joner Daroit

.....  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Louise de Lira Roedel Botelho

Conceito: B

Cerro Largo - RS, Julho de 2013

## **DEDICATÓRIA**

A minha companheira Fátima e minha filha Mariana, pelo apoio recebido ao longo deste Curso, dedico-lhes esta conquista como gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a ajuda e disponibilidade dos meus orientadores, Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser e Prof. Dr. Daniel Joner Daroit;

Agradeço a todos os professores que contribuíram para que se viabilizasse o curso;

Agradeço aos colegas, agora amigos e amigas, pelos momentos vividos ao longo do Curso.

## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

AMB – Associação Mineral Brasileira

ANDA – Associação Nacional para a Difusão de Adubos

CMAP – Capacidade Máxima de Absorção de Fósforo

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FCP – Fator Capacidade de Fósforo

I - Intensidade

IBM – Instituto Brasileiro de Mineração

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração.

IFA – International Fertilizer Industry Association

MME – Ministério das Minas e Energia

PIB – Produto Interno Bruto

PPA's – Plano Plurianual do Orçamento Público

Q – Quantidade

SMB – Sumário Mineral Brasileiro

USGS – United States Geological Survey

## Microorganisms: Alternatives for the solubilization of phosphates in agriculture

**Abstract:** In this work of literature sought to contextualize the biogeochemical cycling of phosphorus, the location and situation of world phosphate deposits and Brazilian main mineralogical formations that gave rise to these deposits (sedimentary or igneous), world consumption and Brazilian phosphate, prospects future for the world market and in Brazil, exporting and importing countries. The dynamics of phosphorus in soil, weathering, soil formation in Rio Grande do Sul, importance of phosphorus for plants, and the importance of organic matter for recycling and solubilization of phosphates were also addressed. Additionally processes mediated by microorganisms (fungi, bacteria and actinomycetes), as possible alternatives to the solubilization of rock phosphates in substitution of industrial fertilizer inputs, and the use of powdered-rock as a long-term alternative for the restoration and balance of soil phosphorus and eutrophication minimization were discussed.

**Key words:** phosphate, weathering, organic matter, microorganisms and phosphate solubilization.

## Microrganismos: Alternativas para a solubilização de fosfatos na agricultura

**Resumo:** Neste trabalho de pesquisa bibliográfica procurou-se contextualizar o ciclo biogeoquímico do fósforo, a localização e situação das jazidas de fosfatos mundiais e brasileiras, principais formações mineralógicas que deram origem a estas jazidas (sedimentares ou ígneas), consumo mundial e brasileiro de fosfatos, perspectivas futuras para o mercado mundial e brasileiro, países exportadores e países importadores. A dinâmica do fósforo no solo, intemperismo, formação do solo no Rio Grande do Sul, a importância do fósforo para os vegetais, e a importância da matéria orgânica para a reciclagem e solubilização do fosfato, também são abordados. Ainda processos mediados por microorganismos (fungos, bactérias e actinomicetos), como possíveis alternativas para a solubilização de fosfatos naturais em substituição aos insumos industrializados, e o uso de pó-de-rocha como alternativa de longo prazo para o restabelecimento e equilíbrio do fósforo no solo e a minimização da eutrofização também são discutidos.

**Palavras chave:** fosfatos, intemperismo, matéria orgânica, microrganismos e solubilização de fosfatos.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2 O CICLO DO FÓSFORO NO AMBIENTE</b> .....	<b>11</b>
2.1 RESERVAS MUNDIAIS DE FOSFATOS .....	12
2.2 JAZIDAS SEDIMENTARES E ÍGNEAS .....	13
2.2.1 Jazidas sedimentares: fosforitos, guano e aluminofosfatados.....	13
2.2.2 Jazidas de rochas ígneas .....	14
2.2.3 Extração mundial de fosfatos .....	14
2.3 PANORAMA BRASILEIRO.....	15
2.3.1 Situação e localização das reservas brasileiras .....	15
2.3.2 Apatitas brasileiras .....	17
2.4 CONSUMO E PRODUÇÃO A NÍVEL MUNDIAL .....	17
2.4.1 Consumo e Produção no Brasil .....	18
2.4.2 Projeção da produção e consumo de rocha fosfática até 2030 .....	19
2.4.3 Importação/exportação de fosfatos .....	20
2.5 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO .....	21
2.5.1 intemperismo .....	21
2.5.2 Fator intensidade, quantidade e capacidade.....	22
2.5.3 Formas de P no solo .....	24
2.5.4 Mineralização e imobilização biológica de fosfatos .....	26
2.5.5 Adsorção de fósforo no solo.....	28
2.5.6 Adsorção de P pela matéria orgânica do solo .....	29
2.5.7 Precipitação do fósforo no solo.....	30
2.5.8 Transformação de fósforo lábil em não-lábil.....	31
2.5.9 Formação do solo e pH .....	32



2.5.10	Formação e pH do solo no Rio Grande do Sul.....	32
2.6	MATÉRIA ORGÂNICA .....	34
2.6.1	Matéria orgânica e lei do mínimo .....	36
2.6.2	Matéria orgânica na estruturação do solo .....	38
2.6.3	Manejo da matéria orgânica do solo .....	38
2.7	IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO PARA OS VEGETAIS .....	41
2.7.1	Transporte e absorção de nutrientes.....	41
2.7.2	Fosfatases .....	42
2.7.3	Sintomas de deficiência de P .....	43
2.7.4	Transformações bioquímicas no solo .....	44
2.8	MICROORGANISMOS: ALTERNATIVAS PARA SUBSTITUIÇÃO AOS INSUMOS INDUSTRIALIZADOS .....	45
2.8.1	Microrganismos na acidificação do solo .....	46
2.8.2	Micorrizas .....	47
2.8.3	Endomicorrizas.....	47
2.8.4	Ectomicorrizas e obtenção de nutrientes a partir de rochas.....	48
2.8.5	Solubilização de fontes inorgânicas de fosfatos em meio sólido e líquido.....	51
2.8.6	Fontes de carbono (comportamento de isolados) .....	52
2.8.7	Matéria orgânica e microrganismos .....	53
2.8.9	Solubilização de pós de rochas .....	56
2.8.10	Fixação simbiótica e reciclagem de nutrientes.....	58
2.9	EUTROFIZAÇÃO DAS ÁGUAS .....	60
3	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS.....	65

## 1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se aqui a monografia de conclusão do curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Desenvolvimento Rural Sustentável e Agricultura Familiar da Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Cerro Largo, com a temática **Microrganismos: Alternativas para a solubilização de fosfatos na agricultura.**

O objetivo geral foi desenvolver pesquisa bibliográfica sobre as possibilidades de utilização de cepas de microrganismos (fungos, bactérias e actinomicetos) em substituição a agroquímicos convencionais, analisando a dependência destes insumos na agricultura brasileira.

Os objetivos específicos foram de evidenciar a complexidade de relações que os microrganismos estabelecem com o solo agrícola e sua capacidade de solubilizar nutrientes minerais; valorizar o potencial econômico e ambiental do uso da microbiologia na agricultura, e promover a microbiologia do solo ao patamar de substituto dos insumos industrializados na agricultura.

A pesquisa teve como tema as possíveis alternativas para a substituição de fosfatos na agricultura brasileira.

Quanto à metodologia foram seguidos os seguintes passos: pesquisa e seleção da bibliografia; os materiais utilizados foram livros, artigos e publicações em meio eletrônico; foi procedida à análise dos dados coletados e feita à produção teórica deste produto; fez-se a revisão da produção teórica, e a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso à Banca Avaliadora.

A pesquisa foi desenvolvida no período de dezembro de 2012 a julho de 2013, e concomitantemente, a produção deste trabalho.

Este trabalho de revisão bibliográfica está dividido em partes, onde será apresentada breve contextualização sobre o **ciclo do fósforo no ambiente**, a **situação mundial dos fosfatos** (reservas e localização, mercado, consumo, produção e como o Brasil se encontra neste cenário). É apresentada a **dinâmica do fósforo no solo**, com algumas de suas particularidades. A importância da **matéria orgânica** do solo, seu manejo, e a Lei do Mínimo. A **Nutrição vegetal** reporta a importância do fósforo para os vegetais, transporte e absorção do fósforo, fosfatases, sintomas de deficiência de fósforo nas plantas. Os **microrganismos**, apresentados aqui como alternativas para a solubilização de nutrientes minerais, inclusive para a solubilização do pó de rocha, técnica já reconhecida e com grande potencial para revigorar solos desgastados em longo prazo. Será

apresentada a relação simbiótica que se estabelece entre plantas, fungos, bactérias e actinomicetos, principalmente quanto à capacidade de solubilizar fosfatos. E também a problemática da **eutrofização das águas**, como consequência de elevados teores de fertilizantes, especialmente aqueles ricos em fósforo e nitrogênio, que adentram em rios, lagos, mananciais e águas superficiais.

Apostar nos microrganismos como forma de desenvolver uma agricultura sustentável pode ser a grande saída para a agricultura no presente, e especialmente, no futuro, visto que ainda são desconhecidas muitas das interações que se estabelecem entre solo, plantas e microrganismos nesta coevolução. Porém, as interações conhecidas e dominadas pela ciência, principalmente pelos microbiologistas do solo, dão conta de sustentar a importância destes para a produção vegetal.

## 2 O CICLO DO FÓSFORO NO AMBIENTE

O fósforo (P), elemento químico de número atômico 15 da Tabela Periódica, mineral não metálico, que desempenha funções importantíssimas tanto da vida vegetal quanto animal, apresenta-se na crosta terrestre em quantidade e teores variados, porém, sua maior concentração encontra-se nos sedimentos oceânicos, de onde não é reciclado. Sua distribuição nos solos ocorre de forma irregular em relação à quantidade e mineralogia. Sabe-se também que este nutriente é fator limitante na produção vegetal e, principal componente dos custos de produção na agricultura brasileira. Sua disponibilidade no solo é quase sempre insuficiente, além de que muitos solos atuam como dreno para este elemento.

O ciclo do fósforo difere dos principais ciclos biogeoquímicos mais importantes na natureza (Ciclo da Água, do Nitrogênio, do Carbono, Oxigênio), que apresentam fases gasosas e cumprem um ciclo natural e estão em constante reciclagem. A água, pelo fenômeno da evaporação tem seu ciclo renovado numa constância, portanto, sua disponibilidade no ambiente é relativamente abundante. O nitrogênio ( $N_2$ ), embora represente 78% da atmosfera terrestre, não é utilizado diretamente pela maioria dos seres vivos. A fixação do nitrogênio ocorre naturalmente pelos raios, chuva, e, no solo, por bactérias de vida livre e, principalmente, pelas bactérias simbióticas em nódulos das raízes. O nitrogênio, conjuntamente com a água e o fósforo estão entre os principais fatores limitantes para o desenvolvimento dos vegetais. O carbono e o oxigênio são constantemente reciclados pela fotossíntese e respiração.

O intemperismo das rochas e dos minerais é o principal fator para a disponibilidade de P na solução do solo. Solos extremamente intemperizados apresentam menor disponibilidade de fósforo, e mesmo apresentando certa simplicidade em seu ciclo, depende de grupos específicos de microrganismos para sua solubilização. O principal reservatório de fósforo é o fundo do oceano, em segundo lugar o solo, terceiro as rochas fosfáticas (jazidas) e em último lugar, numa proporção muito pequena a biota terrestre.

As formas naturais de ciclagem do fósforo são dadas basicamente pela absorção das plantas, que os transferem aos animais, e estes devolvem ao solo na forma orgânica. Estas formas orgânicas sofrem a ação dos microrganismos que as tornam disponíveis as plantas novamente. O fósforo perdido no ecossistema terrestre pela erosão e lixiviação, alcança finalmente os oceanos, onde fica depositado em sedimentos precipitados e nos restos de organismos marinhos, razão pela qual o oceano é o maior depósito de fósforo. Estas grandes reservas de fósforo depositadas no fundo dos oceanos, para serem extraídas de

forma tradicional em jazidas, dependeriam de grandes levantamentos geológicos para que viessem novamente à superfície, neste caso, o tempo não é um bom aliado. O guano, material rico em fósforo é resultado do acúmulo de excrementos (fezes) das aves marinhas em locais onde há grande agrupamento destas. O uso deste material na agricultura constitui-se na principal forma de devolver ao solo partes do fósforo carregado para o fundo do oceano.

Os organismos que ao longo de milhões de anos foram supridos com quantidades necessárias de P, como consequência de seu ciclo natural, podem neste momento sofrer alguns prejuízos decorrentes da ação humana. A demanda cada vez maior para alimentar uma população que cresce desordenada, e sobre espaços inadequados têm apresentado efeitos drásticos em alguns ecossistemas aquáticos, provocando a eutrofização dos mesmos.

O ciclo do fósforo tem sofrido importante alteração com a prática da agricultura, as extrações do P pelas colheitas, a reposição, a erosão de solos mal manejados, as criações concentradas, os dejetos humanos, são alguns dos fatores que afetam o ciclo natural deste nutriente no ambiente. Um manejo racional das fontes de fosfatos se faz necessário, bem como o aprimoramento de técnicas para que seja melhorada sua solubilização e disponibilidade junto aos solos agrícolas.

## 2.1 RESERVAS MUNDIAIS DE FOSFATOS

As reservas mundiais de rocha fosfática, definidas conforme seu conteúdo de  $P_2O_5$  chega a 47 bilhões de toneladas, e se mantido o consumo atual, teriam uma vida útil de 281 anos (KULAIF, 2009). Porém, se considerarmos as reservas atuais e um consumo vigoroso (cenário inovador) de fosfatos estes podem ser exauridos ainda neste século, atingindo seu pico de extração por volta de 2030, posteriormente, entrando em declínio. Ainda Fixen (2009), considerando a elasticidade sobre as informações das reservas, afirma que estes recursos, poderiam apresentar uma longevidade de até 696 anos.

No entanto, constata-se que os dados variam quanto à precisão das reservas fosfáticas, por conta da discrepância das informações disponíveis. Independente desta variação, o que se sabe ao certo, é a importância do P como nutriente mineral, imprescindível ao bom desenvolvimento das culturas agrícolas. Portanto é sobre este aspecto que se pretende identificar as principais características químicas e a concentração

deste nutriente nos minerais fosfatados, onde estão localizadas, quais as principais jazidas, quantificá-las conforme dados oficiais disponíveis, no Brasil e no Mundo.

## 2.2 JAZIDAS SEDIMENTARES E ÍGNEAS

Quanto à concentração de P, as rochas fosfáticas que apresentam importância econômica, são classificadas como sedimentares e ígneas. Os depósitos sedimentares de maior importância são formados por fosforitos, guano e alumino-fosfatos, enquanto que as de origem ígneas são rochas com composição ultrabásica e alcalina.

### **2.2.1 Jazidas sedimentares: fosforitos, guano e alumino-fosfatados**

Os fosforitos são formados a partir da deposição e acumulação em bacias marinhas (sedimentos) de mares rasos, material rico em fosfatos, composto por excrementos de animais marinhos, ou de esqueletos de animais mortos, acumulados por milhões de anos.

Nestes depósitos, o fósforo é encontrado na forma de hidróxi-fluorapatita  $[Ca_5(PO_4)_3OH,F]$ , ou de apatita carbonata  $[Ca_5(PO_4CO_3OH)_3F]$ . É um material de razoável pureza, mas, que normalmente, ocorre misturado à areia, argila ou carbonato, formando arenitos, folhelhos, e calcário fosfáticos (KULAIFF, 2009).

Quanto aos teores de  $P_2O_5$ , os fosforitos apresentam quantidades variáveis com oscilações de concentração. Em algumas jazidas pode ocorrer baixa concentração de P, o que diminui sua importância como matéria prima fertilizante, porém, pode alcançar até valores de 35% de concentração de P, quantidades boas e de grande rendimento no beneficiamento. Estes sedimentos estão distribuídos em camadas de alguns centímetros e podem chegar a uma dezena de metros, e se espalharem por quilômetros.

Os depósitos de guano, formados a partir dos excrementos de aves marinhas, quando depositados sobre rocha calcária resultam em fosfato de cálcio, este material constitui uma das formas de adubação mais completa existente na natureza, e pode ser usado para todos os tipos de vegetais. Além da forma encontrada sobre as rochas, é encontrado também, em mares rasos e lagoas, quando estas recebem, ou receberam grande quantidade de aves marinhas ao longo do tempo e que ali, depositam/depositaram seus excrementos. Outro local que o guano pode ser encontrado são as cavernas, que foram, ou

são habitadas por morcegos, que pelo seu hábito de vida acabam deixando neste ambiente quantidade significativa de guano, excremento rico em fosfatos.

Quando o excremento é depositado sobre rochas de composição ferro-aluminosa, bauxitas, lateritas, ou rochas feldespáticas, formam-se depósitos de minerais amorfos de fosfato de alumínio hidratado e fosfato de ferro, conhecidos como alumino-fosfatos. Os fosfatos deste tipo são assimiláveis, e precisam ser previamente tratados para posterior aplicação como fertilizantes (SOUZA, 2001).

No Brasil, os depósitos sedimentares ocorrem principalmente no estado de Pernambuco, Minas Gerais. No estado de Santa Catarina tem-se conhecimento de jazidas sedimentares em Anitápolis, Pirocaua e Trauíra no Maranhão, e sedimentos do tipo guano na ilha de Fernando de Noronha.

### **2.2.2 Jazidas de rochas ígneas**

Os depósitos de rochas fosfáticas de origem ígnea estão associados às rochas alcalinas, intrusivas (resfriamento no interior da crosta) ou extrusivas (resfriamento em superfície), ou a veios hidrotermais associados a elas. Nestas rochas o fósforo é encontrado na forma de apatita, sendo a fluorapatita  $[Ca_5(PO_4)3F]$  uma de suas formas predominantes, mas se apresenta também de forma secundária em fosfato de bário e estrôncio (gorceixita e goyazita) e de terras-raras (rabdofanita) (KULAIIF, 1999; KULAIIF et.al 2009).

Os depósitos ígneos frequentemente apresentam baixo conteúdo de apatita, mas podem ser beneficiadas, atingindo de 36 a 40% de  $P_2O_5$ . Por serem poucos reativos, os minerais de depósitos ígneos não são muito recomendados para aplicação direta em solos cultiváveis, e para serem utilizados precisam ser finamente moídos no processamento de fertilizantes (FIXEN, 2009).

### **2.2.3 Extração mundial de fosfatos**

A maior parte da produção mundial de fosfato depende da extração das jazidas de rochas sedimentares. Suas maiores reservas estão localizadas no Marrocos/Saara Ocidental, China, Oriente Médio e nos Estados Unidos. A preferência pela extração destas jazidas é motivada pela alta concentração do  $P_2O_5$ , baixo custo de extração e pelo rendimento do beneficiamento mineral. As principais reservas de rochas fosfatadas ígneas estão no Brasil, Canadá, Rússia e África do sul. Os dados de reservas mundiais, com sua distribuição pelas regiões do mundo, são apresentados a seguir (Tabela 01).

Tabela 01- Reservas mundiais de rocha fosfática ( $10^3$  t de  $P_2O_5$ ).

Países	Reserva Mundial ( $10^3$ t de $P_2O_5$ ).	% do total
Brasil	319.000	0,7
Marrocos/Saara Ocid.	21.000.000	44,7
China	10.000.000	21,3
Estados Unidos	3.400.000	7,2
África do Sul	2.500.000	5,3
Jordânia	1.700.000	3,6
Austrália	1.200.000	2,6
Rússia	1.000.000	2,1
Síria	800.000	1,7
Israel	800.000	1,7
Egito	760.000	1,6
Tunísia	600.000	1,3
Canadá	200.000	0,4
Senegal	160.000	0,3
Togo	60.000	0,1
Outros Países	2.558.380	5,4
<b>Total Mundial</b>	<b>47.051.000</b>	<b>100,0</b>

Fonte: USGS (2009a).

De acordo com os dados apresentados na tabela acima, percebe-se que existe uma grande concentração das jazidas de fosfatos a nível mundial, onde Marrocos/Saara Ocidental, China e Estados Unidos detêm quase 75% das reservas de fosfatos, principalmente de jazidas sedimentares. O Brasil aparece apenas na décima segunda posição, com predominância das jazidas ígneas, que não apresentam os mesmos rendimentos de extração quando comparadas às jazidas sedimentares.

## 2.3 PANORAMA BRASILEIRO

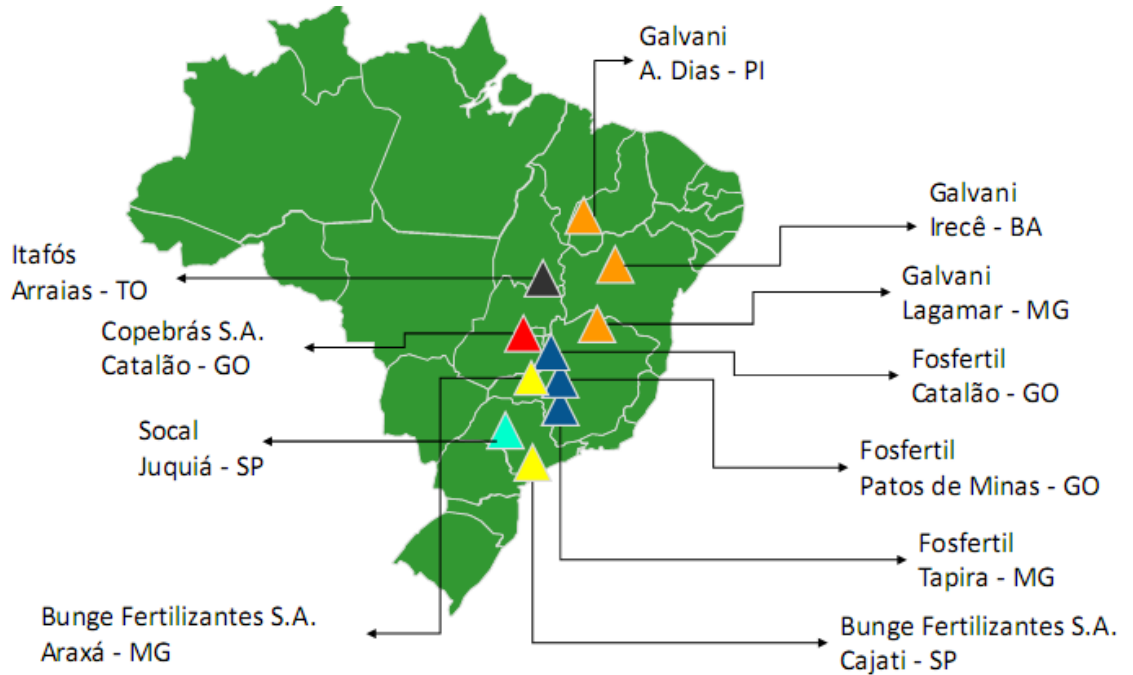
### 2.3.1 Situação e localização das reservas brasileiras

Conforme dados aferidos até 2007, as reservas de fosfatos brasileiras são da ordem 319 milhões de toneladas de  $P_2O_5$ , sendo destas 67% concentradas no estado de Minas Gerais, 14% em Goiás, 6% em São Paulo, e o restante distribuído pelos estados de Tocantins, Ceará, Pernambuco, Paraíba, Bahia e Pará. As principais jazidas no estado de Minas Gerais se encontram nos municípios de Tapira, Patos de Minas, Araxá e Lagamar. No estado de Goiás, a jazida de Catalão e Ouidor, a jazida de Cajati em São Paulo e Irecê na Bahia.



As principais reservas de fosfatos no Brasil estão distribuídas e podem ser visualizada no mapa a seguir. Também pode ser observada qual a empresa mineradora opera em cada jazida ativa.

Mapa 01 – Jazidas de fosfatos e Empresas Mineradoras



Fonte: Arcoverde (2008), modificado; KULAIF et al (2009).

É importante ressaltar que conforme dados do Anuário Mineral Brasileiro (AMB) apresentado em 2007, a evolução do montante das reservas medidas vem se mantendo constante desde 2001, com média de 300 milhões de toneladas. Outro aspecto relevante é quanto aos teores médios de  $P_2O_5$  apresentados pelas jazidas atuais, em 1982 era 9,4%, enquanto os dados das jazidas em operação em 2007 apresentam uma queda de 9%, quando comparadas àquelas, apresentando significativa queda do teor médio de fosfatos diminuído para 8,6%, o que sinaliza para um maior custo quanto ao beneficiamento deste mineral, demanda que vem sendo enfrentada com novos investimentos e tecnologias mais adequadas à mineração.

### 2.3.2 Apatitas brasileiras

As apatitas brasileiras, que em muitos casos apresentam baixa reatividade, podem em condições naturais serem insuficientes no fornecimento do P frente à demanda das culturas (P na solução do solo). Matérias primas para a produção de fertilizantes fosfatados são encontradas basicamente nas rochas ígneas, de difícil extração e complexa mineralogia. Estes fosfatos, frequentemente, apresentam baixo conteúdo de apatita, mas podem ser beneficiadas, atingindo de 36 a 40% de  $P_2O_5$ . Os minerais de depósitos ígneos são poucos reativos e, conseqüentemente, não muito adequados para aplicação direta nos solos cultiváveis (FIXEN et al., 2009). Ainda conforme Souza:

(...) os depósitos de apatita têm uma mineralogia extremamente complexa, tendo impurezas (contaminantes) de influência marcante no rendimento (recuperação) de fósforo nas plantas (usinas) de beneficiamento desses minérios, resultando em altos custos de produção, muito embora já tenham ocorrido muitas melhorias tecnológicas para aproveitamento dessa apatita (2001, p.1).

Importante ressaltar que os teores de  $P_2O_5$  encontrados neste tipo de depósito (rocha ígnea), normalmente, oscilam entre 4,0 e 15%, portanto, bem abaixo dos valores encontrados nas jazidas sedimentares, que apresentam teores médios mundiais para os fosfatos ao redor de 17%. Quando comparadas, as jazidas sedimentares apresentam grande viabilidade econômica para exploração e rendimento mineral em relação às jazidas de apatitas. As jazidas sedimentares estão concentradas em poucos países, que figuram entre os grandes exportadores mundiais do nutriente. No Brasil, os depósitos de apatita representam cerca de 80% das jazidas de P.

## 2.4 CONSUMO E PRODUÇÃO A NÍVEL MUNDIAL

O consumo do P a nível mundial ainda está bastante concentrado, e o destaque no consumo vem associado à capacidade instalada para a produção de fertilizantes fosfatados solúveis e, sua estreita dependência do ácido fosfórico para seu beneficiamento. A indústria do ácido fosfórico, instalada nos países detentores de extensas reservas de rochas fosfáticas é a mola propulsora para que estes estejam entre os maiores consumidores do ácido e de fosfatos. Países com alta densidade populacional estão se consolidando entre os grandes consumidores de fosfatos, esta expansão no consumo dada por conta da enorme demanda por alimentos.

A tendência mais recente aponta para os países produtores de *commodities* agrícolas para exportação, como o grande mercado potencial para consumo de fosfatos. O

consumo mundial de rocha fosfática na forma de  $P_2O_5$ , em 2008, foi de 34,48 milhões de toneladas, e esteve concentrado na China, com 29 %, seguida pela Índia, com 16%, Estados Unidos, com 11%, e Brasil, com 9% do total (KULAIF, 2009).

Conforme dados apurados até 2007, ouve um crescimento médio de 2,3% ao ano no consumo de fosfatos, com destaque para a Ásia, crescimento de 8%, e consumo total de 38% de P mundial; a América do Norte consumiu 19% do P mundial; com decréscimo de 2%, considerando os últimos cinco anos; a União Européia, 5,7% do consumo mundial, apresentou decréscimo médio de 2,5% nos últimos cinco anos. A América Latina, porém, teve incremento de 2,1% no consumo anual para o mesmo período, conforme divulgado pela International Fertilizer Industry Association (IFA), (KULAIF et al., 2009).

Considerando dados de 2008, cerca de 167 milhões de toneladas de fosfatos foram produzidas no mundo naquele ano. Com 30% da produção estava a China, em primeiro lugar, seguida por Estados Unidos, 19%, Marrocos e Saara Ocidental 17%, concentrando 66% da produção mundial de fosfato. O Brasil aparece na sexta posição, com uma produção de 6,18 milhões de toneladas, correspondendo a 3,7% da produção mundial, (KULAIF, 2009).

#### **2.4.1 Consumo e Produção no Brasil**

Com um consumo superior a oito milhões de toneladas ao ano, a agricultura brasileira, não tem respondido a campo em termos de produção, ou seja, há incompatibilidade entre o crescimento da demanda de P e os índices de produtividade. Neste sentido, convém observar que:

O consumo de fertilizantes no Brasil cresce muito mais do que a produção agrícola. Entre 1987 e 2007, um período de 20 anos, a produção agrícola cresceu 59%, enquanto o consumo de adubos cresceu 143%, para um aumento da área colhida de apenas 13% (LAPIDO-LOUREIRO, 2008; KULAIF et al., 2009, p.21).

O fosfato, assim como outros agrominerais (enxofre e potássio), são exemplos de minerais insuficientes no subsolo brasileiro. No ano de 2008, as importações de matérias-primas e produtos intermediários de fosfato, potássio e enxofre, atingiram US\$ 11,3 bilhões. Esta dependência deixa o país muito vulnerável. A grande demanda por produtos importados faz do mercado brasileiro apenas tomador de preços, e as cotações internas para o preço dos insumos seguem o mercado internacional. Por outro lado, esta ascendência do consumo de fosfatos com pequeno incremento em produtividade, faz

refletir sobre outras questões relacionadas ao solo e à produtividade, tais como: manejo do solo, plantas recicladoras, atividade biocenótica, matéria orgânica, nutrientes volatilizados, lixiviados e adsorvidos, entre outros fatores.

A produção de fosfatos no período 2006-2010, manteve-se no patamar de 6 milhões de toneladas. Em 2011, houve pequeno incremento na produção, algo em torno de 300 mil toneladas, elevando a produção de fosfatos para 6,3 milhões de toneladas. Esta produção é insuficiente para a demanda de fosfatos em aproximadamente 2 milhões de toneladas, e aquém das estimativas previstas para a produção nacional, que têm perspectivas de incremento na produção, com vários projetos voltados para aumentar a exploração das jazidas em atividade e com meta para chegar em 2015 com produção de aproximadamente 10 milhões de toneladas ano.

#### **2.4.2 Projeção da produção e consumo de rocha fosfática até 2030**

No primeiro momento, para se alcançar a auto-suficiência, tem-se uma meta de curto prazo, que pretende incrementar a produção atual entre 4 e 5 milhões de toneladas até o ano de 2015. Para o cumprimento desta meta já existem vários projetos anunciados, “os planos de investimento para rocha fosfática em implantação ou apenas anunciados, se concretizados, adicionarão 4 milhões de toneladas anuais até 2013, significando que o País atingiria autossuficiência” (KULAIF, 2009, p.29). Sobre estes investimentos, não se encontra muitas informações, portanto, não é possível afirmar neste momento se todos os investimentos anunciados conseguiram cumprir com suas etapas e metas para implementação.

Conforme dados apurados, não permitindo muita precisão, até 2011 houve pouco incremento do que foi a produção média 2006 - 2010, pouco acima de 6 milhões de toneladas. Com base nestas informações, a meta não foi alcançada como o previsto, podendo ainda ser atingida até 2015.

Para atender à demanda de fosfatos na agricultura e indústria brasileira, conforme os cenários de crescimento projetados até 2030, será necessário um acréscimo na produção prevista para 2015, de mais 5 a 7 milhões de toneladas, saindo dos aproximados 6,5 milhões de toneladas para algo em torno de 15 a 17 milhões em 2030. Produção que daria ao Brasil uma condição de autossuficiência em matéria de fosfatos.

A projeção para o consumo de fosfatos no país, até o ano de 2030, leva em conta três cenários possíveis para a evolução da economia. Cenário Frágil -1, crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de 2,3% a.a.; Cenário Vigoroso - 2, crescimento de 4,6% a.a.; e Cenário Inovador - 3, com crescimento de 9,9% a.a. Para que se possa melhor ilustrar os possíveis cenários, apresenta-se as projeções abaixo (Tabela 02).

Tabela 02 - Projeções do consumo aparente de rocha fosfática 2010-2030 em t produto concentrado.

Consumo aparente (t)	2008		8.025.317 t
Cenários	Frágil	Vigoroso	Inovador
Crescimento do PIB	2,3% a.a.	4,6% a.a.	6,9% a.a.
Consumo aparente (projetado) 2010	8.568.863	8.674.674	8.761.757
Consumo aparente (projetado) 2030	14.139.665	17.6751	20.677.814
Períodos quadrienais dos PPA's ano final			
2008-2011	8.787.432	8.998.242	9.171.219
2012-2015	10.149.480	10.845.927	11.428.649
2016-2019	11.307.253	12.646251	13.788.637
2020-2023	11.980.502	13.821.473	15.354.206
2024-2027	12.363.081	14.532.212	16.325.239
2028-2031	14.139.665	17.675.261	20.677.814

Fonte: SMB: MME/DNPM (2009)

### 2.4.3 Importação/exportação de fosfatos

O Brasil, um dos maiores importadores mundiais de fertilizantes, consumiu no ano de 2007, oito milhões de toneladas de fosfatos. Deste montante, mais de 20% foram importados, cabendo este suprimento a Marrocos, com 53%, e Togo, 20%, conforme divulgado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBM). O ano de 2011 apresentou composição um pouco mais descentralizada para os fosfatos importados pelo Brasil, cabendo a Marrocos 24%, Rússia 21%, China 21% e Estados Unidos com 14%, este montante de fosfatos importados correspondeu a 1,4 milhões de toneladas.

Nos últimos trinta anos, o consumo aparente aumentou cerca de seis vezes, com maior peso nas importações a partir do ano 2000. Quanto às exportações, o Brasil tem como principais mercados a Argentina e o Paraguai, portanto, de dimensões inexpressivas, relativas a produtos intermediários para a fabricação de fertilizantes. Os produtos intermediários para fertilizantes fosfatados são os fosfatos diamônico, monoamônico, superfosfato simples, superfosfato triplo, termofosfato e fosfato natural de aplicação direta (SOUZA, 2001).

## 2.5 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO

Para compreender o processo de absorção do P pelas plantas, o conceito fonte-dreno utilizado em Fisiologia Vegetal será de grande importância. Conforme Novais (2007), quando a planta tem no solo sua principal fonte de nutrientes, atua como dreno, e, poderá ter sua produção limitada caso estes nutrientes não se apresentem em quantidades satisfatórias.

Neste caso, a produção pode se viabilizar pelo incremento, através da adubação, e sua reposição, feita de acordo com as retiradas pelas culturas. Pode ocorrer também do solo se apresentar como dreno, situação em que ambos, solo e planta competirão pelo nutriente, caso dos solos com alto teor de argila e em estádios avançados de intemperismo. “Num solo muito intemperizado, dada sua mineralogia, o aumento de seu teor de argila fará com que haja aumento preferencial de seu caráter dreno, enquanto num pouco intemperizado haverá como consequência, aumento preferencial de seu caráter fonte” (NOVAIS, 2007, p. 474).

Ainda segundo Novais:

O solo poderá ser fonte de P quando ainda apresentar características nutricionais (reservas) favoráveis as plantas, mesmo que insatisfatórias. O que se adiciona como fertilizantes irá somar-se, sem maiores restrições, às reservas já existentes no solo. No caso do solo-dreno, haverá competição entre planta (dreno) e o solo pelo P adicionado como fertilizante. Solo e planta, como drenos, estarão competindo entre si pelo fertilizante aplicado, e, em muitos dos casos, o dreno-solo é maior que o dreno-planta (2007,p. 473).

### 2.5.1 Intemperismo

Com o aumento do grau de intemperismo, o solo sofre mudanças em suas características químicas, tornando-se mais eletropositivo. Essa mudança é provocada pelo perfil de cargas. Conforme Novais (2007), a capacidade de troca catiônica (CTC efetiva) cai, a adsorção aniônica aumenta, diminuindo a saturação por bases, enquanto aumenta gradualmente a retenção de ânions, como o fosfato, o sulfato, o molibdado, entre outros. Com o intemperismo, os solos passam de forma gradual de fonte para dreno de P.

(...) em condições extremas de intemperismo, como acontece em alguns Latossolos de cerrado, o solo é um forte dreno de P. Para torná-lo fonte, são necessárias grandes quantidades de fertilizantes fosfatos. Solos como estes podem adsorver mais de  $2 \text{ mg cm}^{-3}$  de P (Ker, 1995), valor que equivale a  $4.000 \text{ kg ha}^{-1}$  de P ( $9200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), incorporado de 0 a 20 cm de profundidade. Enquanto plantas de cultivo anual, como a soja, imobilizam em toda sua biomassa aproximadamente  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, o solo pode imobilizar ou fixar até 200 vezes mais em formas “não-trocáveis”, adequadamente denominados não-lábeis (Novais 2007, p.473).

Em condições naturais, o intemperismo continuará, o solo será continuamente drenado de P, o que deverá aumentar com o tempo. Portanto, conhecer as características do solo e sua fração de argila é a principal condição para se definir se um solo é drenado para P ou não.

O fósforo, como é sabido, tem a crosta terrestre como seu principal reservatório para a agricultura. O lento intemperismo das rochas e dos minerais é a maior fonte para quantidades de P na solução do solo. “O fósforo circula das plantas para os animais e retorna ao solo em formas orgânicas, as quais depois são convertidas em formas inorgânicas por microrganismos, e assim tornam-se disponíveis para as plantas” (RAVEN, 2007 p. 684).

Como sua mobilidade no solo é relativamente pequena, muito pouco do fósforo é perdido no ecossistema terrestre por lixiviação em condições naturais, e esta perda é compensada pelo intemperismo das rochas. Portanto, a ação humana tem provocado efeitos drásticos sobre o ciclo de alguns nutrientes, a necessidade de alimentar populações cada vez maiores tem provocado grandes desequilíbrios no solo, sendo um destes, o P drenado pelas colheitas ou quando perdido por erosão.

A remoção feita pelas colheitas e o aumento da erosão tem acelerado a perda de fósforo nos solos agricultáveis, ficando sua disponibilidade cada vez menor. A reposição feita pela incorporação de fosfatos provindos de outras regiões e até de fora do país, tem sido motivo de preocupação quanto à oferta e preço deste insumo muito demandado na agricultura brasileira.

### **2.5.2 Fator intensidade, quantidade e capacidade**

O P se encontra na natureza nas seguintes proporções em ( $10^{12}$  kg): 840.000 nos sedimentos oceânicos, onde não é reciclado, exceto pela erupção de um vulcão, o que é muito improvável; de 96 a 182 retido no solo, constituindo-se no segundo maior reservatório de fósforo, que está distribuído em todos os continentes, sendo deste mineral que as plantas em condições naturais buscam satisfazer suas necessidades de nutrição fosfatada; 19 em rochas minerais sedimentares e ígneas (jazidas), mineral utilizado para a fertilização agrícola e indústria; e apenas 2,6 na biota terrestre, sendo 1,8 estocada na fitomassa e 0,8 estocados na biomassa microbiana. Apesar de representar pequena fração, o P contido na biomassa vegetal e animal, principalmente, dos microrganismos do solo

quando associados às raízes desempenham importantes funções na relação solo planta para o suprimento de P (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

De acordo com Novais (2007), já em 1930, foram desenvolvidas pesquisas de excelente qualidade a respeito da relação existente entre o Fator Intensidade (I, P-solução) e Fator Quantidade (Q, muito maior que I) de P na solução do solo. “O autor verificou que a concentração de P em solução nutritiva necessária ao crescimento satisfatório de diferentes plantas era, sistematicamente, maior que a concentração de P na solução do solo”. O Fator Capacidade de Fósforo (FCP) é definido quantitativamente pela relação Q/I. “Com o aumento de I (adição de fertilizante, por exemplo), haverá um aumento de Q, mantendo a relação Q/I constante, o que a caracteriza como propriedade intrínseca de um solo”.

Conforme observado por Tidmore, *apud* Novais:

Em solução nutritiva, o crescimento máximo das plantas foi obtido com, pelo menos, 0,5 ppm  $(\text{PO}_4)^{2-}$ ; um pequeno crescimento das plantas foi obtido com 0,05 ppm de  $(\text{PO}_4)^{2-}$ . Por outro lado, solos onde não havia respostas a adição de fertilizantes fosfatados apresentavam concentração de P em solução inferior a 0,02 ppm  $\text{PO}_4$  (traços) o autor concluiu que “a solução extraída não é a verdadeira solução do solo, e que a fase sólida tem uma função importante no suprimento de P às plantas (Novais et al., 2007, p.478).

Solos intemperizados com maior teor de argila apresentam grande adsorção de P. Consequentemente, a relação Q/I será maior do que em solos com menor adsorção, como nos arenosos e, se argilosos, menos intemperizados.

A compreensão do significado de I, Q e Q/I é essencial ao entendimento do comportamento da planta em diferentes solos, dos extratores do “P-disponível”, da “solubilidade” (reatividade) e do aproveitamento de fontes de P, do residual do P aplicado em cultivos anteriores, da recomendação de adubação, de possíveis perdas e conseqüentes problemas ambientais, etc. (Novais, 2007, p.497).

Sobre o Fator Intensidade de P no solo e o crescimento das plantas, estabeleceu-se que 0,2 mg L<sup>-1</sup> de P como concentração necessária ao máximo crescimento. Porém, este fator pode estar sujeito a outras variáveis.

Essas informações, contrárias ao nível crítico de 0,2 mg L<sup>-1</sup>, revelam a necessidade de conhecer mais um fator, quantidade ou capacidade, como sugerido por Rajan (1973), para se conhecer a resposta de plantas à disponibilidade de P no solo. Assim, a concentração de 0,2 mg L<sup>-1</sup> de P, tida como nível crítico para solos com baixo fator capacidade (FCP), como os arenosos, mesmo em condição de maior intemperismo, pode ser reduzida a valores inferiores a 0,05 mg L<sup>-1</sup> em solos com grande FCP. Nesse caso, apesar do baixo valor de I, sua reposição pelo fator quantidade (Q) é bastante intensa após a absorção de P pela planta (NOVAIS, 2007, p. 479).



Como se pode observar, o fator intensidade não é suficiente para que se estabeleça nível crítico de P na solução. Conforme demonstrado, o fator quantidade de P sólido no solo e a composição do mesmo devem ser mensurados conjuntamente. E quantitativamente a resposta da planta é muito mais dependente de Q do que de I, dada a expressiva diferença de grandeza entre ambos. Logo, para fins práticos, o P quantidade é a soma do P solução mais a concentração do elemento no solo, de modo geral, o P solução (I) muitíssimo menor que o fator quantidade (Q).

### 2.5.3 Formas de P no solo

Os teores de P no solo são muito variáveis, e esta variação se dá principalmente pelo material de origem, idade ou estágio de desenvolvimento. As rochas basálticas que apresentam altos teores de P dão origem a solos com alto teor de P. Os Latossolos com alto teor de argila apresentam mais P que solos arenosos. Quanto mais intemperizado o solo maior a tendência de perdas de P.

Segundo Bissani, o P é encontrado nas seguintes formas e quantidades:

O P total da maioria dos solos situa-se entre 0,03 e 0,34% (300 e 3400 mg/dm<sup>3</sup> de P), sendo que na sua quase totalidade está na forma sólida, constituindo compostos de P orgânico e de P inorgânico. O P da solução do solo é constituído principalmente de P inorgânico e sua concentração é geralmente menor do que 0,1 mg/dm<sup>3</sup> (2004, p. 117).

Portanto, como já visto anteriormente, o P solução (I) apresenta-se numa proporção significativamente menor que P quantidade (Q), que representa os teores totais de P no solo, e podem estar sob a forma de P orgânico ou inorgânico.

O P orgânico do solo se origina dos restos animais e vegetais que lhe são incorporados. Os solos com baixo teor de matéria orgânica apresentam teores de apenas 4% de P na MOS (matéria orgânica do solo), enquanto que em solos orgânicos, o P orgânico pode chegar a 90% do P total (BISSANI et al; 2004).

O fósforo pode ser disponibilizado para as plantas sob as mais variadas fontes minerais, as quais se caracterizam basicamente pela sua maior ou menor solubilidade (P-Solução). O P-Solução, de acordo com Novais (2007), depende das condições do solo e pode migrar para alguma forma de baixa solubilidade (retrogradação), constituindo-se em fonte mineral. Em condições de elevado pH do solo, o P em solução poderá ser precipitado em formas de baixa solubilidade, causando decréscimo no tamanho do compartimento P-Solução e aumento no compartimento fonte mineral. Quando se observa o P-Solução

retrogradando a fonte mineral, “algo inverso a pratica de suprir P à planta estaria acontecendo.

Segundo Novais:

Solos com pH mais elevado, com muito Ca trocável, natural ou como consequência de uma super calagem, podem ter a precipitação de fosfatos adicionada ao solo (Sample et al., 1980), fenômeno denominado “retrogradação” por Malavolta1967 (Novais et al., 2007, p.490).

As Fontes orgânicas também podem provocar efeitos à semelhança do que ocorre com as fontes minerais, atuar como fonte (aumentar) ou como dreno (diminuir) do P-Solução.

Com a mineralização dos resíduos de cultivos, ou mesmo da matéria orgânica humificada do solo, o P liberado da biomassa contribuirá para o maior conteúdo de P-Solução. Por outro lado, poderá haver imobilização temporária do P da solução do solo pela sua incorporação à biomassa microbiana, aumentada por uma fonte de C, como resíduos de cultivos, com limitado conteúdo de P para atender ao crescimento da população de microrganismos. Portanto, para a mineralização desses resíduos, há necessidade de imobilizar o P da solução do solo por um tempo correspondente ao decréscimo da fonte de C, reduzindo a relação C/P do resíduo a valores semelhantes ao da biomassa microbiana. Com isso o P-Solução volta a aumentar, com predomínio da Mineralização sobre a Imobilização. (NOVAIS, 2007 p. 475).

Os processos bióticos desencadeados pelos microrganismos do solo, não têm recebido a mesma atenção quando comparado aos processos abióticos, porém, pode-se afirmar que, a influência direta ou indireta dos microrganismos no ciclo do P e na absorção pelas raízes é bastante evidente. Os microrganismos influenciam desde as transformações do P no solo ou na rizosfera até a absorção e translocação do nutriente na planta (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). Portanto, sabe-se que as transformações de P estão interligadas por processos complexos controlados por reações químicas com grande interferência biológica, dentre as quais: a mineralização, imobilização e absorção, principais processos que influenciam a dinâmica do P no solo e seu fluxo no ambiente.

Devido a pouca importância dada pelas instituições de ensino e pesquisa, o P orgânico do solo ( $P_o$ ) é tratado com clara indiferença em relação ao P inorgânico ( $P_i$ ). Tratamento que parece ser consequência de uma agricultura de grandes insumos, solos altamente intemperizados em grande parte do país, onde solo-dreno prevalece sobre solo-fonte em relação ao P. Estes parecem serem alguns dos aspectos que contribuíram para o fato do  $P_o$  do solo não ter recebido a mesma distinção do  $P_i$ .

Cultivos agrícolas com alta produtividade somente são possíveis com altas doses de insumos solúveis, e neste caso o ( $P_o$ ), não responde a esta produtividade, pelo menos, não

em sua totalidade. Porém, questiona-se, se a contribuição do ( $P_o$ ), seria sempre pequena. Mas, e nas pastagens, cultivos perenes, florestas, na agricultura de poucos insumos e para os solos orgânicos, a contribuição do P orgânico não é importante?

Estudo realizado em solos do Rio Grande do Sul, onde foram amostrados solos da região sul do estado e solos do planalto com o objetivo de determinar a relação entre  $P_o$ , P total do solo, e a relação C/P, foi observado o que segue. Os valores de  $P_o$  variaram de 45 a 519  $\text{mg dm}^{-3}$ , de P total de 78 a 1.162  $\text{mg dm}^{-3}$  e os de C/P 127 a 320. Como observado a concentração de  $P_o$  destes solos ficou acima de 50% do P total, com maiores concentrações nos solos da região sul do estado, quando comparados aos solos do planalto (MACHADO et al., 1993).

Em estudos de amostras de solos do nordeste brasileiro, incluindo Afisols, Ultisols, Oxisols e Vertisols, principais solos desta região, encontraram concentração média de P total igual a 482  $\text{mg kg}^{-1}$  e de  $P_o$  igual a 208  $\text{mg Kg}^{-1}$ . O que corresponde a uma média ( $P_o$ ) de 43% para o P total do solo (NOVAIS et al., 2007).

O teor de  $P_o$  do solo constitui importante fonte de P à agricultura de poucos insumos, especialmente as dos trópicos, em solos mais intemperizados. Para as regiões de temperaturas amenas, o  $P_o$ , fica em torno de 50% nos solos argilosos, com maior teor de C orgânico, e pH baixo. A queima de restos vegetais também contribui para o incremento de  $P_o$ , o que leva a conclusão de que formas inorgânicas de P são convertidas a  $P_o$ , e que este, em condições de cultivo, apresenta caráter fonte.

As principais fontes de  $P_o$  do solo são os ortofosfatos de monoésteres, ortofosfatos de diésteres e fosfanatos. Os ortofosfatos de monoésteres são representados principalmente pelos hexafosfatos de inositol (fitatos), que compreendem de 50 a 90% do  $P_o$  do solo. Essa predominância dos fitatos, deve-se, pelo menos em parte, à sua elevada afinidade pelos oxi-hidróxidos de Fe e Al.

#### **2.5.4 Mineralização e imobilização biológica de fosfatos**

Os processos de mineralização e imobilização do P orgânico do solo se dão por uma dinâmica associada ao ciclo dos microrganismos e a disponibilidade de matéria orgânica. Conforme Novais (2007), quando num primeiro momento a biomassa microbiana aumenta ocorre a imobilização de grande parte do P orgânico para seu crescimento. Quando reduzida a relação C/P do resíduo orgânico para valores semelhantes ao da

biomassa microbiana, o P solução volta a aumentar com predomínio da mineralização sobre a imobilização.

De acordo com Moreira e Siqueira:

A atividade microbiana é responsável pela mineralização do P orgânico e atua também em outros processos no solo. Diversos microrganismos, incluindo isolados de bactérias, actinomicetos, fungos e protozoários, são capazes de hidrolisar P de muitos compostos orgânicos através da produção da fosfatase, cuja atividade pode ser um indicador da transformação da MOS, através do estabelecimento da relação entre a cinética da fosfatase e taxa de decomposição (2006, p.373).

A imobilização do P orgânico e sua mineralização é um dos processos mais dinâmicos que ocorre entre a matéria orgânica e os microrganismos do solo, devido à grande demanda de P para o crescimento microbiano. Resulta em alta concentração de P na massa seca das bactérias, podendo corresponder a até 2%, constituindo-se no segundo nutriente mais abundante na matéria orgânica do solo. Mesmo sendo pequeno o estoque de P nos microrganismos do solo (P biológico), sabe-se que apresenta intenso fluxo devido à rápida reciclagem. Conforme calculado por Siqueira (2006 p. 373) "... a biomassa microbiana recicla cerca de 70 vezes mais P por ano que a fitomassa, colocando em evidência a importância dos processos biológicos no ciclo deste elemento".

As condições ambientais e a mineralogia do solo estão entre os fatores de maior relevância para mineralização do P, "em solos minerais ácidos, grande parte do P liberado é rapidamente fixado à fração inorgânica", sua conversão para compostos orgânicos se dará pela imobilização na biomassa, ocorrendo de forma rápida com "taxa de Pi para P-orgânico de 6  $\mu\text{g}$  de P  $\text{g}^{-1}$  de solo por semana". O P biológico mineralizado poderá contribuir para a fração lábil do P no solo.

A imobilização de fosfato é mais provável de se dar quando o ortofosfato disponível no solo estiver em concentração abaixo do exigido pela microbiota. Essa concentração não é conhecida, mas a quantidade de P imobilizada é diretamente relacionada à de biomassa. (SIQUEIRA, 2006, p. 374).

Para crescimento e decomposição da matéria orgânica, os microrganismos imobilizam parte do P disponível. Logo a biomassa microbiana encontra como fator limitante a deficiência de P, concorrendo pelo P com o solo e com as plantas. No solo, os ortofosfatos, como observado em vários estudos estão mais disponíveis para as plantas em valores de pH perto do neutro; em solos relativamente ácidos, os íons ortofosfatos são geralmente precipitados ou adsorvidos por espécies de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ; já em solos alcalinos, os

ortofosfatos podem reagir com o carbonato de cálcio para formar um composto relativamente insolúvel.

### 2.5.5 Adsorção de fósforo no solo

Conforme Novais (2007), o termo adsorção é utilizado no sentido amplo por muitos autores. Ainda há um termo adicional para a retenção do P ao solo, ou mais específico, para referir-se ao P não-lábil. A fixação, utilizada mais adequadamente para identificar a formação do P não-lábil, não mais em equilíbrio com o P-solução.

Também é comum na literatura encontrarmos sorção, termo genérico que engloba adsorção e absorção. A adsorção indica reações químicas e mesmo físicas, que ocorrem nas interfaces do solo. As reações com hidróxidos, por exemplo, são chamadas de adsorventes. Quando em superfícies porosas, ocorre à difusão dos adsorvatos para dentro dos microporos dando continuidade a estas reações, e a este fenômeno dá-se o nome de absorção. Este pode ser um processo lento, e em solo recém-fertilizado o P pode ficar agregado às superfícies por tempo relativamente longo, logo, constituindo-se em P não-lábil.

Conforme Novais, a adsorção do P ao solo efetua-se em dois estádios:

As reações do primeiro estágio ocorrem em minutos ou horas, ao passo que as do segundo estágio são bem mais lentas. A rápida reação de adsorção inicial é um fenômeno de superfície, enquanto formas ativas de Al e de Fe em solos ácidos e de Ca em solos neutros ou cálcicos levam, também, a uma rápida precipitação de P solúvel (2007, p. 498).

Para um melhor aproveitamento do fósforo, faz-se necessário ter-se um bom conhecimento de como este elemento se comporta no solo. Sua reciclagem esta intimamente ligada ao ciclo de outros elementos, matéria orgânica e a atividade biológica. Como apontado por Moreira e Siqueira (2006, p. 369), “a imobilização de C e N em sistemas biológicos; o acúmulo de C, N, P e S na matéria orgânica dependem do conteúdo de P no material de origem, exercendo, portanto, influência na fertilidade do solo”.

Dentre as principais formas de adsorção do P no solo, a adsorção por oxidróxidos de ferro e alumínio são predominantes em solos ácidos. “Nessa reação, denominada quimiossorção, há troca de ligantes, como  $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}_2^+$ , da superfície dos óxidos, por fósforo da solução”, ocorrendo ligação predominantemente covalente (adsorção

específica). A ordem preferencial de adsorção de ânions pelo solo é a seguinte: fosfato >arseniato > selenito = molibdato >sulfato = fluoreto > cloreto > nitrato.

Portanto:

Com o aumento do pH, a carga superficial das partículas do solo torna-se cada vez mais negativa, aumentando a repulsão (menor adsorção) entre fosfato e superfície adsorvente e diminuindo o potencial eletrostático do plano de adsorção (Haynes, 1984; Barrow, 1985). Como consequência a adsorção de P pelo solo deve ser máxima com baixos valores de pH” (NOVAIS et al., 2007, p. 487).

### **2.5.6 Adsorção de P pela matéria orgânica do solo**

Quanto à adsorção de P pela matéria orgânica do solo, ocorre principalmente, por seu caráter aniônico, via pontes de cátions, estabelecidas com ferro, alumínio e cálcio a ela adsorvidos, formando complexos provocando a retenção do P. Porém, há trabalhos mostrando participação negativa da Matéria Orgânica (MO), reduzindo a adsorção do P no solo, por meio de ácidos orgânicos adsorvidos e bloqueando sítios de adsorção, ou solubilizando esses oxidróxidos e reduzindo suas superfícies de adsorção.

Como exposto por Novais et al., (2007), a MO tanto pode agir na adsorção como na dessorção do P no solo. Frequentemente, a Capacidade Máxima de Absorção de Fósforo (CMAP)do solo aumenta com seu incremento, já a adição de resíduos orgânicos de origem animal (esterco), tem causado efeito contrário, geralmente diminuindo a adsorção e aumentando a disponibilidade de P para as plantas. Esta disponibilidade de P às plantas ocorre pela ação de alguns ácidos orgânicos, que são facilmente mineralizados quando em contato com o solo. Como observado:

A aplicação de esterco de curral, como reposição contínua destes ácidos, a exsudação de raízes e o metabolismo de microrganismos, como fontes naturais desses ácidos, mantêm este processo de bloqueio de sítios de adsorção de P de maneira mais contínua e, portanto, mais efetiva. (NOVAIS et al., 2007, p.489).

O solo quando adsorve ácidos orgânicos com grande energia compete com os sítios de adsorção de P fazendo aumentar a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Conforme as estruturas desses ácidos, especialmente as moléculas com maiores grupos funcionais, como OH (hidróxido) e COOH (ácido carboxílico), são mais efetivas na competição pelos sítios de adsorção, há exemplo do ácido málico, com um grupo OH e dois COOH, foi mais efetivo em reduzir a adsorção de P do solo que o ácido acético, com um COOH apenas.

Outro aspecto importante quanto ao efeito da adição de resíduos orgânicos para a retenção de P, está relacionada com a concentração de P no resíduo. Quando a concentração do material adicionado contém teores de P menores que  $2 \text{ g kg}^{-1}$  de P total a imobilização da solução torna-se maior que a mineralização, relação C:P menor que 100 leva a mineralização do P orgânico; maior que 300 leva à imobilização de formas minerais de P pelos microrganismos (Novais 2007).

### 2.5.7 Precipitação do fósforo no solo

O fenômeno da precipitação é uma das formas de retenção de P no solo. Nos solos ácidos este fenômeno se dá pela reação de P com íons de Fe e Al, enquanto que em solos neutros ou calcários com o  $\text{Ca}^{2+}$  formando compostos de composição definidas e pouco solúveis (NOVAIS, 2007).

Portanto, precipitados de Fe e Al apresentam baixa solubilidade em pH ácido, o que significa que compostos fosfatados precipitados por estes elementos tenderiam a permanecer imobilizados por longos períodos em meio ácido. A elevação do pH pela incorporação do calcário é uma prática que traz grandes benefícios para o P do solo aumentando sua solubilidade. Enquanto que para precipitados de Ca precisa-se de situação inversa, ou seja, diminuição do pH.

Para minimizar a precipitação dos fosfatos no solo, recomenda-se fazer a adição de calcário antes da incorporação de P, quando boa parte do alumínio do solo ácido será adsorvida pelos hidróxidos formados pela calagem e terá como efeito a diminuição para a precipitação do fosfato.

Apesar da pouca mobilidade no solo, o P está sujeito a uma complexa dinâmica, onde vários são os fenômenos envolvidos, como observado por Berwanger (2008):

A dinâmica do P no solo é muito complexa e envolve processos de imobilização-mineralização, adsorção-dessorção e precipitação-solubilização. A adsorção se dá pelo mecanismo de troca de ligante, que compreende a saída do  $\text{OH}^-$  ou  $\text{H}_2\text{O}$  e a entrada do íon fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4$  ou  $\text{HPO}_4^{-2}$ ) dependendo do pH do solo e nos grupos funcionais dos óxidos e da caulinita especialmente. A interação entre o O do fosfato e o cátion do grupo funcional, principalmente do aluminol dos argilominerais, e os grupos Fe-OH e Al-OH da superfície dos óxidos ocorre pelo compartilhamento eletrônico e, portanto, apresenta diferentes graus de energia de ligação (Berwanger, et al., p. 2526).

### 2.5.8 Transformação de fósforo lábil em não-lábil

A retenção de P no solo é um fenômeno bastante conhecido, por ser formador do fator capacidade de P (Q), porém, quando essa fração de P lábil, passa a formar P não-lábil (NQ), tem-se um problema, porque Q de forma passiva supre o P não-lábil (NQ). Uma vez que o P se encontra em compostos não-lábeis, seu desprendimento demanda energia. “Algumas práticas, como a diminuição do potencial redox e a adição, ou acúmulo, de matéria orgânica ao solo, suprem a demanda de energia para que esse sistema torna-se reversível, pelo menos parcialmente” (NOVAIS, et al., 2007).

Ainda sobre estas transformações Novais observa que:

Embora essa retenção seja um fenômeno favorável à utilização do P pelas plantas, o “envelhecimento” dessa retenção, com a formação do P não-lábil, torna-se problemático. A retenção do P adicionado ao solo, em formas lábeis ou não, ocorre tanto pela precipitação do P em solução com formas iônicas de Fe, Al e Ca, como, principalmente, de maneira mais significativa, pela sua adsorção pelos hidróxidos de Fe e de Al, presentes, de modo geral, em maiores quantidades em solos tropicais mais intemperizados, particular nos mais argilosos (2007, p. 486).

Como observado anteriormente, solos bastante intemperizados são mais propícios para a retenção de P não-lábil, principalmente os tropicais, constituindo-se em solo drenado. Já as plantas, para conseguirem suprir sua demanda pelo fosfato precisam ser muito eficientes, devido à carência de P imposta pelo intemperismo.

“O NQ é a quantidade de P fixado no solo que não se encontra em equilíbrio com o P solução, pelo menos em curto prazo” (NOVAIS, 2007). Esse fenômeno pode ocorrer pelas fortes ligações que os óxidos de ferro estabelecem com o P através de ligações mono e bidentadas. Estas ligações são estabelecidas a partir de fontes solúveis de P aplicado ao solo e a superfície adsorvente dos oxidróxidos do solo. Nesta primeira fase, acontece ligação mono, e ocorre já nas primeiras horas de contato do P com o solo, esta primeira fase é seguida de uma segunda ligação mais lenta, onde o P ficará fortemente adsorvido entre dois oxidróxidos do solo. Essa fase mais lenta de adsorção de P pelo solo é também caracterizada pela penetração (difusão) do fosfato nas imperfeições dos cristais (difusão em fase sólida), ou entre microcristais, tornando-se cada vez menor seu equilíbrio com o P solução e, por conseguinte, a disponibilidade para as plantas.

Portanto, solos que apresentam forte tendência à retenção de P na forma não-lábil precisam ser manejados em relação à aplicação de P de acordo com o ciclo das culturas. Evitar a fosfatagem antecipada, uma vez que esta ficaria retida na forma não-lábil.



Uma das estratégias para a adubação fosfatada nestes casos é minimizar o contato da fonte de P com o solo, principalmente a solúvel, “pela granulação do fertilizante, pela diminuição do tempo de contato do fertilizante com o solo, em relação à época de plantio, ou, até mesmo, pelo parcelamento da aplicação de P, como se faz com N” (NOVAIS et al., 2007).

As formas não-lábeis de P no solo, apresentam estreita relação com intemperismo avançado, ou seja, presença de oxidróxidos de ferro e de alumínio. Portanto, para minimizar o efeito provocado por estas ligações, a redução do  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$  em solos hidromórficos, pode favorecer a dessorção do P, por exemplo. Neste caso, a redução de  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$  e a presença de ácidos orgânicos (compostos), resultado de processos fermentativos, são favoráveis à redução e à manutenção da CMAP (Capacidade Máxima de Absorção de Fósforo) em valores baixos, não permitindo que o solo expresse seu caráter drenado, mesmo que em ambiente tropical (NOVAIS, et al., 2007).

### **2.5.9 Formação do solo e pH**

Os solos brasileiros na grande maioria apresentam pH ácido. Esta formação se deve a fatores ligados ao material de origem (rocha mãe), tempo, clima, relevo, organismos, latitude, índices pluviométricos. Solos ácidos são aqueles que, geralmente apresentam teores de alumínio e manganês que podem ser tóxicos às plantas, prejudicando o desenvolvimento e, interferindo na produtividade. Os solos que se encontram nas zonas de clima quente e com altas precipitações pluviométricas são, na maioria, ácidos (pH < 5,5), mesmo que os materiais que lhe deram origem não tenham reação ácida em contato com a água (MEURER, 2010).

### **2.5.10 Formação e pH do solo no Rio Grande do Sul**

Quando analisado material rochoso que dá origem aos solos do RS, rocha mãe (basalto, arenito e granito, conforme tabela 3), se constata que estes materiais quando finamente moídos, em contato com a água, apresentam uma reação próxima da neutralidade, contrastando com os teores de acidez dos solos no estado, do qual, os mesmos deram origem. De acordo com estudos realizados em solos do RS, via amostragem e posteriormente análise constatou-se o que segue:

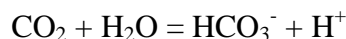
Levantamento realizado com cerca de 60.000 amostras de solos coletadas no Estado do Rio Grande do Sul indicou que 70% delas apresentaram pH em

água inferior a 5,5 que é o valor de referência para indicar solos que podem apresentar problemas de toxidez de alumínio e manganês para as plantas e microrganismos (MEURER, 2010, p. 149).

Os materiais aqui analisados são predominantemente formadores dos solos do Rio Grande do Sul. Apresentam características comuns, são pouco solúveis em água, e para sua intemperização foram necessários milhares de anos. Sobre a intemperização pode-se dizer que: “É um processo que, após iniciado, torna-se, cada vez mais facilitado, é, portanto, um processo progressivo, a não ser que cessem todos os fatores” que lhe dão causa (Pinheiro, 2005, p. 20).

Para entender como estes solos se tornaram ácidos ao longo de sua formação, faz-se necessário observar alguns aspectos de sua evolução no ambiente. Conforme Meurer:

As reações de hidrólise que ocorrem na solução dos solos, a decomposição dos resíduos orgânicos pelos microrganismos, ação do homem e a própria absorção dos nutrientes pelas plantas são, também, fatores que contribuem para a acidificação dos solos. Inicialmente, ocorre a solubilização da rocha, porque a água da chuva que entra em contato com a mesma é ácida devido à dissolução e reação do CO<sub>2</sub> da atmosfera da água, como mostra a reação a baixo: (2010, p. 151).



(gás carbônico mais água resulta em ácido carbônico mais hidrogênio livre)

Os processos de acidificação do solo nas regiões tropicais e subtropicais começam com a solubilização da rocha, e posteriormente a perda de cátions do solo, principalmente os de menor valência (cálcio, magnésio, potássio e sódio), que por formarem compostos mais solúveis percolam no perfil do solo. Por outro lado, o alumínio e o ferro, por terem maior valência, estabelecem trocas preferenciais com as argilas e a matéria orgânica (ácidos orgânicos), permanecendo fixos na camada superficial do solo, contribuindo para sua acidez/toxidez, como é constatado na maioria dos solos gaúchos. As tabelas abaixo permitem comparar as matérias que dão origem do solo gaúcho e como se apresentam hoje depois de longo período de intemperização.

Tabela 03. Composição química elementar (parcial) e pH de três rochas do estado do Rio Grande do Sul e sua reação (na forma de pó) com a água (adaptado de Bohnen, 2000).

Rocha	pH	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
.....%.....							
Arenito	6,9	0,20	0,10	0,10	0,04	1,7	0,29
Basalto	6,9	0,81	0,17	3,85	0,19	6,0	4,4
Granito	7,3	0,40	0,20	4,07	4,02	6,6	0,38

MEURER et al 2010

Tabela 04. Composição química elementar (parcial) e pH do horizonte superficial de três solos do Rio Grande do Sul formados a partir do arenito, basalto e granito (BOHNEN, 2000).

Solo	Material	pH	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
.....mg kg <sup>-1</sup> .....								
Argisolo	Arenito	4,2	0,1	0,3	0,7	0,4	31	10
Latossolo	Basalto	4,9	0,7	0,8	1,5	0,4	106	119
Laterítico	Granito	4,6	0,2	0,4	2,5	0,4	21	114

MEURER et al 2010

Ao se analisar as tabelas acima, compreendemos a composição do nosso solo a partir da rocha mãe e temos uma idéia de como vai se comportar no futuro. Precisamos estar sempre vigilantes quanto ao pH e toxidez, nutrientes como o alumínio e o ferro tendem a continuar aumentando naturalmente em proporção aos demais, nutrientes como Ca, Mg, Na e K vão escoando via colheitas ou lixiviando e, conseqüentemente, as correções da acidez precisam ser constantes. As práticas agrícolas e manejos inadequados também contribuem para que estes elementos com poder de acidificação e toxidez expressem seu potencial.

## 2.6 MATÉRIA ORGÂNICA

As civilizações que desenvolveram a agricultura, ao praticaram esta atividade por milhares de anos, dependiam, para o sucesso de suas colheitas, principalmente, da fertilidade natural do solo em que cultivavam. No antigo Egito, as terras mais disputadas eram aquelas fertilizadas pelas cheias do Rio Nilo, que transbordava deixando grandes quantidades de matéria orgânica sobre suas várzeas, o que permitia aos camponeses da época fazerem boas colheitas. Os Fenícios no Oriente, e os Maias na América, descobriram

que plantando em terraços, evitavam a perda do solo e retinham a matéria orgânica, indispensável para seus cultivos.

Sobre os Maias, chama atenção uma forma de oferenda que faziam a seus deuses, este povo depositava um peixe na cova que receberia em seguida as sementes do milho, e tinham como resposta uma excelente produção do cereal. Não sabiam que estavam adubando com excelente material orgânico, rico em nitrogênio e fósforo, nutrientes fundamentais para uma boa produção. No Oriente, as camas de animais e os esterco eram utilizados desde a antiguidade como forma de adubação do solo. Alguns filósofos que viveram na antiga Roma pouco antes, ou logo depois da Era Cristã, deixaram vários registros, descrevendo práticas de adubação dos agricultores daquele tempo, como a “estercação”, a calagem, a adubação verde, a rotação de cultura e a cobertura morta. Técnicas que ainda hoje são consideradas de grande importância para o incremento e a manutenção da fertilidade dos solos agrícolas (KIEHL, 1985).

Praticamente todas as formas de agricultura desenvolvidas no mundo até o ano de 1842, tinham basicamente na matéria orgânica sua forma de fertilização do solo. Com o desenvolvimento dos estudos do jovem Justus Von Liebig sobre a teoria mineralista, este assegurava que a nutrição dos vegetais se dava pela absorção dos nutrientes minerais em solução no solo, e que a limitação da produção estava relacionada à falta de determinado nutriente (Lei do Mínimo), e que, as plantas não necessitavam de matéria orgânica alguma para seu desenvolvimento.

Esta teoria acirrou os ânimos dos estudiosos do assunto da época, mas como sabemos hoje, as plantas não absorvem os nutrientes na sua forma orgânica e sim, mineralizada, ou outros compostos, como exemplo: o nitrogênio na forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ), o fósforo nas formas de radicais iônicos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) e o potássio na forma catiônica ( $\text{K}^+$ ). Com os avanços nos estudos, e o conhecimento da microbiologia, sabe-se que, a disponibilidade dos nutrientes contidos na matéria orgânica somente será disponibilizada para as plantas, após, sofrerem processo de decomposição pela ação dos microrganismos e terem seus constituintes orgânicos mineralizados.

Importante observar que, esta teoria, conhecida como Lei do Mínimo, ou Lei de Liebig, ganhou de imediato a simpatia dos industriais e de alguns governos, banqueiros e alto escalão das forças armadas, especialmente na Alemanha, França e Inglaterra. Estes viram logo o potencial da descoberta, passando a defendê-la e fomentá-la. A indústria dos fertilizantes deu grande impulso neste princípio de Revolução Industrial, muito por conta,

da aposta na industrialização de insumos fertilizantes. Estes países conseguiram ampliar sua força política, econômica, industrial e militar, na Europa no primeiro momento e, na sequência, na maioria dos países que tinham vocação para a agricultura.

A agricultura tradicional sofreu grande impacto desta nova onda tecnológica, a indústria dos fertilizantes provocou grandes transformações nas relações agrícolas, e a fertilização química tornou-se a principal forma de fertilização na agricultura, enquanto que as alternativas orgânicas ficaram em segundo plano.

Desde que Liebig, a mais de 160 anos, enunciou os princípios pelos quais as plantas se nutrem (substâncias mineralizadas, inclusive de produtos de síntese química), as extrações de nutrientes feitas pelas colheitas, segundo esta tese, podem ser repostas simplesmente, pela incorporação de nutrientes minerais advindos da indústria de insumos. A respeito desta teoria, é importante considerar o que observa Machado:

Isso despertou o interesse de indústrias que têm financiado uma enorme massa de pesquisa, cujos resultados as escolas de agronomia repassam aos estudantes, com todos os rótulos da ciência formal. Assim, a pesquisa privada e também a maior parte da oficial, tem desenvolvido toda uma conduta tecnológica, baseada na suposta imprescindibilidade do uso permanente de fertilizantes sintéticos solúveis (2004, p. 101).

### **2.6.1 Matéria orgânica e lei do mínimo**

Com os mais variados papéis, a matéria orgânica no solo é tão importante que será considerada aqui como fator limitante para a produção.

Conforme Malavolta:

A redução excessiva do teor da matéria orgânica do solo prejudica-o física, química e biologicamente, redundando em diminuição de produção. Nesses casos em obediência à lei do mínimo, a adubação orgânica torna-se necessária, pois a matéria orgânica baixa começa a limitar as safras (2006, p. 29).

Considerando o citado acima e de acordo com vasta bibliografia que trata do assunto, pode-se assegurar sobre a importância da matéria orgânica e de seus benefícios para o solo. Os adubos orgânicos, não são apenas importantes pelos nutrientes que contêm, mas também pelo material que incorporado ao solo e decomposto é convertido em humus, pelo seu conteúdo energético para os microrganismos do solo, pelo efeito regulador da temperatura do solo, pela melhoria da estrutura e arejamento do solo, pelo aumento da capacidade de retenção de água, além de retardar a fixação do fósforo, dificultar a lixiviação do potássio, do cálcio, do magnésio e outros nutrientes, aumenta a capacidade de

troca catiônica, e ainda, alguns produtos da sua decomposição têm efeito hormonal sobre as raízes, estimulando seu desenvolvimento (MALAVOLTA, 2006).

A matéria orgânica não oferece nutrição às plantas pelo húmus, mas, sim, quando este é mineralizado. A matéria orgânica apresenta sua relevância quando analisada sob a perspectiva da nutrição dos microrganismos do solo. As bactérias fixadoras de nitrogênio, após infectarem as raízes, estabelecem relação simbiótica com as plantas através das nodulações que produzem na rizosfera, nódulos que acumulam compostos ricos em nitrogênio e que vão sendo disponibilizados para as culturas durante o ciclo ou depois da decomposição e mineralização. Relação semelhante acontece com os fungos, que além de excelentes decompositores de material orgânico, também se estabelecem na rizosfera vegetal, onde se alimentam de seus exsudados, compostos orgânicos ricos em açúcar, a partir desta relação inicia-se um trabalho simbiótico, onde as micorrizas ali fixadas estabelecem ampla relação com a rizosfera, ampliando em muito a capacidade de absorção dos nutrientes e água pelos vegetais. Importante observar, que muitos destes microrganismos possuem capacidade para a solubilização de nutrientes, a ação dos ácidos que produzem aprimora esta relação simbiótica, que é resultado da coevolução de plantas e microrganismos.

Além dos efeitos diretos da matéria orgânica no solo, se faz importante enfatizar aqueles indiretos, fatores que muitas vezes são minimizados, ou pouco conhecidos pelos agricultores e produtores.

Neste sentido convém observar Malavolta:

(...) a matéria orgânica do solo funciona como reserva de nutrientes e melhoradora de suas propriedades físicas, químicas e biológicas. No primeiro papel não há dúvida de que ela pode ser substituída, muitas vezes com vantagem, pelos minerais. Entretanto seus efeitos indiretos nas culturas não podem ser reproduzidos por nenhum por nenhum produto da indústria do adubo. A colheita pode, assim, ficar limitada pela falta de matéria orgânica, principalmente pelos efeitos desfavoráveis na estrutura do terreno... (MALAVOLTA et al; 2006, p. 31 e 32).

### **2.6.2 Matéria orgânica na estruturação do solo**

A importância da matéria orgânica para a estruturação e fertilidade do solo é consenso entre os conhecedores do assunto, e quando da sua falta, o empobrecimento do solo faz-se notar. Os sistemas de cultivo, que ainda não adotam um manejo adequado do solo, e os pastos mal manejados, provavelmente, estão entre as atividades agrícolas que mais contribuem para a desestruturação do solo, e conseqüentemente, para baixo rendimento dos cultivos e criações. Sobre a importância da matéria orgânica para a estruturação do solo, Pinheiro afirma que:

O solo e sua fração principal, a matéria orgânica - MO – são uma associação viva de cuja constituição fazem parte frações inanimadas, que desempenham funções igualmente essenciais, como a estrutura, textura, porosidade, substâncias químicas e muitas outras (2004, p. 87).

Neste contexto, o solo precisa ser tratado como um organismo vivo, coabitado por outros organismos. Os processos vitais que determinam a intensidade das atividades biológicas na rizosfera e, conseqüentemente, uma boa estruturação do solo, passam obrigatoriamente pela disponibilidade de matéria orgânica no meio, de onde seus atores extraem energia, água e nutrientes essenciais para uma intensa atividade biocenótica.

Os ingredientes físicos, bem articulados com os químicos e biológicos, são de fundamental importância para que se defina uma boa estruturação do solo. Pinheiro afirma: “É indispensável um grau harmônico entre os diversos agregados, para organizarem uma macro e micro porosidades, que estimulem a circulação de água e do ar no solo e a acessibilidade dos diversos organismos, de acordo com seus tamanhos”.

Uma boa estruturação do solo resulta de componentes distintos e heterogêneos, seu material vivo inclui raízes, microrganismos e pedofauna, enquanto seus componentes não vivos compõem-se de raízes mortas, metabólitos microbianos e substâncias húmicas (GLIESSMAN, 2000). Quando o solo agricultável sofre as mudanças provocadas pelos cultivos, a tendência natural é de que seu teor de matéria orgânica comece a declinar, a menos que ações específicas sejam adotadas.

### **2.6.3 Manejo da matéria orgânica do solo**

Além das práticas tradicionais de manejo e conservação do solo como: rotação de culturas, plantio em nível, plantio direto, plantas recuperadoras de solo, aportes de esterco, e outros materiais, estas são algumas das ações que compõe o conjunto de

medidas para que se mantenha ou se recupere a fertilidade do solo. “A primeira etapa para desenvolver a matéria orgânica do solo é manter aportes constantes de material, para substituir aquela que é perdida por colheita e decomposição” (GLIESSMAN, 2000, p. 230).

A agricultura atual, com seu foco no mercado, reduziu muito a diversidade de plantas cultivadas, a preferência por culturas especializadas, que respondem em produtividade de grãos, mas que deixam pouco residual de material orgânico no solo, não sendo suficiente para que esta se mantenha estável. Este material residual em muitos casos acaba por ser o principal aporte de matéria orgânica do solo.

Estes restos de cultivos, também podem representar riscos para cultivos seguintes, e uma série de fatores ainda precisam ser resolvidos para que se desenvolvam estratégias eficazes para seu manejo. Neste sentido, “uma das maiores preocupações é de como lidar com, pragas e doenças que os restos podem abrigar e transmitir a um cultivo subsequente” (GLIESSMAN, 2000, p. 231).

Para lidar com os problemas de restos de culturas e seus riscos aos cultivos seguintes, uma das primeiras recomendações que se deve observar, diz respeito à rotação de culturas, ou intercalar culturas de interesse econômico com coberturas verdes de solo (plantas para recuperação de solo ou adubo verde). Alternativa que apresenta grande potencial para a incorporação de matéria orgânica, incorporação de nitrogênio atmosférico, reciclagem de nutrientes lixiviados, além de todos os benefícios para a atividade da microbiota e fauna do solo.

Sobre o uso adequado das plantas recicladoras ou de cobertura, Gliessman afirma que:

Estas plantas são, normalmente, semeadas em rotação com uma cultura ou durante uma época do ano em que a lavoura não pode ser cultivada. Quando leguminosas são usadas como cultura de cobertura, tanto solteiras quanto em consórcios com espécies não leguminosas, a quantidade da biomassa pode ser bastante melhorada. A biomassa resultante pode ser incorporada ao solo, ou deixada na superfície como cobertura protetora até se decompor. (2000, p. 231, 132).

Experimentos conduzidos com a finalidade de observar o incremento de matéria orgânica no solo, por plantas de cobertura, são conclusivos quanto às vantagens dos sistemas consorciados. O material resultante dos consórcios entre gramíneas e leguminosas apresenta em alguns casos, incrementos de quase o dobro de matéria orgânica quando comparado a cultivos de leguminosas apenas. Mais recentemente, vem recebendo uma



abordagem importante o uso de coberturas verdes intercaladas a culturas perenes, especialmente, parreirais e frutíferas arbóreas. Porém, carece ainda de pesquisa para que sejam minimizados os efeitos negativos das plantas de cobertura à espécie produtiva, quando ambas concorrem pelos mesmos nutrientes (GLIESSMAN, 2000).

Outras fontes de matéria orgânica como esterco e compostos, também figuram entre as possibilidades de fertilização do solo e incremento de material orgânico. Os esterco por sua vez, apresentam alguns inconvenientes como odor e junção de moscas, e quando manejados inadequadamente podem ser agentes de contaminação do solo, mananciais e águas subterrâneas pela lixiviação de nitratos e outros materiais solúveis. Quanto ao uso dos esterco, recomenda-se que se faça sua compostagem antes do uso no solo, para que o mesmo estabilize e tenha seus efeitos negativos diminuídos.

A compostagem apresenta uma série de vantagens em relação ao uso de materiais orgânicos frescos. Os avanços recentes das pesquisas com inúmeras fontes de materiais orgânicos, esterco, restos vegetais, subprodutos agrícolas, indicam que quase todo material orgânico pode se tornar recurso para a fertilização do solo. Sobre a compostagem, Gliessman sustenta que:

Sob condições controladas, a matéria orgânica fresca passa pelos primeiros estágios de decomposição e humificação, de forma que, quando é adicionada, já está consideravelmente estabilizada e pode contribuir com maior eficácia para o processo de formação da fertilidade do solo. Desta maneira, os dejetos – incluindo outros materiais que de outra forma iriam para os aterros sanitários já superlotados – estão sendo convertidos em recursos (2000, p. 233).

Como observado, a compostagem se apresenta como uma técnica viável para o melhor aproveitamento de recursos orgânicos frescos. Cada fonte de matéria orgânica disponível precisa ser examinada a partir da sua capacidade de resposta para as culturas, o fornecimento de nutrientes precisa estar em relevo, deve-se estimar qual a contribuição que esta pode dar diante da necessidade nutricional da cultura a curto, médio e longo prazo.

A matéria orgânica pela sua importância na dinâmica do solo e de seus agentes biológicos, não pode de modo algum ser negligenciada na agricultura. Suas várias formas de obtenção e uso precisam receber sempre manejo adequado, para que se obtenha o melhor resultado, e para que sejam minimizados seus impactos negativos (especialmente excrementos animais mal manejados), de forma que esta contribua para a fertilidade do solo em todos os seus aspectos (físicos, químicos e biológicos).

## 2.7 IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO PARA OS VEGETAIS

Os íons  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , absorvidos na solução do solo e carregados até as folhas das plantas pela seiva bruta, não sofrem oxidação e permanecem na forma de fosfatos. Conforme Bissani:

O radical de fosfato no interior da planta pode estar como íon livre em solução, ligado a cátions metálicos formando compostos solúveis ou complexos solúveis e, na forma mais importante, ligado a radicais orgânicos (fósforo orgânico). Os compostos fosfatados mais importantes são os ácidos nucleicos (ADN e ARN), fosfatos inositol, fosfolipídios, di e trifosfato de adenosina (ADP e ATP) e fosfato de nicotinamida adenina dinucleotídeo (NADP)(2004, p. 117).

O P constituinte fundamental de compostos orgânicos é essencial para a divisão celular, a reprodução e o metabolismo vegetal (fotossíntese, respiração e síntese de substâncias orgânicas). O P é um macronutriente bastante móvel nos tecidos vegetais, apresenta maiores concentrações nos tecidos novos e pode se translocar via floema das partes mais velhas para aquelas em desenvolvimento. Sua concentração nos tecidos é bastante variada entre as espécies, porém, nas sementes, o P é encontrado em maior quantidade, principalmente na forma de fitina (sal de Ca e Mg do hexafosfato de inositol). Este composto é hidrolisado enzimaticamente (fosfatases) durante a germinação e, então, o P na forma de íons fosfato livres, pode ser utilizado pela planta em desenvolvimento.

### 2.7.1 Transporte e absorção de nutrientes

Os nutrientes disponíveis na solução do solo deslocam-se em direção às raízes das plantas por um processo conhecido como fluxo de massa, ocorrendo por difusão dos locais de maior para de menor concentração. A velocidade deste transporte depende de fatores como: teor de água no solo, concentração do nutriente, velocidade com que o nutriente é absorvido, velocidade de difusão do nutriente, temperatura e, características do solo são alguns aspectos que interferem no transporte e absorção do nutriente. Os três principais macronutrientes demandados pelas plantas, podem ser classificados de acordo com sua mobilidade no solo, o nitrogênio, considerado como nutriente móvel, o fósforo, mobilidade pequena, nutriente considerado imóvel no solo, o potássio, considerado de mobilidade intermediária.

Responsável por várias funções vitais nos vegetais, o P se constitui em um dos mais importantes nutrientes minerais, como segue:

O fósforo (P) é um elemento importante a todas as formas de vida por fazer parte de biomoléculas como ácidos nucleicos e ATP. Os organismos vivos absorvem P na forma de ortofosfato solúvel, que no caso das plantas e dos organismos do solo, esse nutriente é obtido da solução do solo onde sua concentração é muito baixa (2 a 5  $\mu\text{M}$ ). A absorção do P é um processo ativo que acontece contra um forte gradiente de concentração, tendo-se em vista que, no citoplasma, deve-se manter uma concentração de 5 a 10 mM. Devido à alta exigência das plantas e a baixa disponibilidade no solo, esse nutriente é quase sempre limitante ao crescimento delas, que geralmente apresentam grande déficit nutricional de P. (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006, p. 368).

O fósforo tem grande importância para desencadear o processo de germinação nas plantas. Logo, é fundamental que a semente tenha suas reservas deste nutriente em condições adequadas para uma vigorosa germinação e, conseqüentemente, um bom enraizamento. Presente em todas as funções vitais dos organismos, participa das mais variadas fases de desenvolvimento das culturas. O fósforo, na planta, apresenta comportamento muito diferente de quando presente no solo. Conhecido pela sua pouca mobilidade no solo, nos vegetais este comportamento se inverte. Sobre sua mobilidade Pinheiro (2005), observa que:

Nas plantas jovens, de rápido crescimento, o Fósforo concentra-se, com preferência, no tecido meristemático. O Fósforo move-se com facilidade dentro das plantas e translada-se dos tecidos mais velhos para os mais jovens, ou seja, reutiliza-se. À medida que vai amadurecendo o cultivo, a maior parte do Fósforo assimilado vai-se concentrando nas sementes e frutos (nas sementes dos cereais até 50%) (p. 159).

### 2.7.2 Fosfatases

Genericamente conhecidas pelo nome de fosfatases, estas enzimas capazes de hidrolisar fosfatos orgânicos (liberando P inorgânico) são produzidas pelos microrganismos e, de acordo com o pH do solo podem ser caracterizadas como fosfatases ácidas ou alcalinas. Tanto fungos quanto bactérias produzem fosfatases nas diferentes condições de pH, os fungos apresentam melhores resultados de solubilização em extratos ácidos, enquanto que as bactérias nos alcalinos. “O efeito da calagem foi verificado apenas para as bactérias e fungos produtores da fosfatase ácida. Enquanto as populações de fungos com atividade fosfática diminuíram por efeito da calagem, as das bactérias aumentaram” (NAHAS, 2002, p. 273). Também observou comportamento diferenciado quanto ao crescimento da população solubilizadora em extratos fertilizados com fosfatos e não fertilizados. Conforme relatado por Nahas:

(...) o efeito da fonte de fósforo ocorreu apenas sobre as bactérias produtoras de fosfatases alcalinas cujas populações foram maiores nos

tratamentos com super fosfato e controle com superfosfato natural, e controle que o tratamento fosfato natural, e para os fungos de modo inverso, maior número foi encontrado na ausência que na presença de adubação fosfatada (2002, p. 272).

Como observado, a adubação fosfatada tem apresentado melhores resultados para as cepas de bactérias em relação aos fungos. Vários estudos também apontam para uma melhor colonização por microrganismos na rizosfera quando o solo apresenta limitação para o P.

### **2.7.3 Sintomas de deficiência de P**

Quando disponibilizado de forma insuficiente no solo, o P age como fator limitante na produção vegetal. Alguns sintomas perceptíveis da deficiência são: plantas pouco desenvolvidas (caule atrofiado), má fecundação, maturação tardia dos frutos, falhas na granação dos cereais, folhas de coloração verde-escuras e muitas vezes arroxeadas. Como observado por Pinheiro:

A influência do Fósforo sobre a vitalidade das plantas é muito variada. A boa nutrição fosfórica não só eleva a consideravelmente a colheita dos cultivos agrícolas, mas melhora sensivelmente sua qualidade. Nos cereais, aumenta a parte do grão no total da massa, o grão faz-se mais rico em amido e, às vezes em proteína. Nos frutos e nas raízes tuberosas, acumulam-se mais hidratos de Carbono. Os cultivos têxteis têm a fibra mais longa e mais resistente (2005, p. 157).

A insuficiência de fósforo reduz o crescimento das culturas, e também faz com que seja retardada a maturação, fenômeno que altera o ciclo da cultura e conseqüentemente, da colheita. Portanto, para que se tenha um cultivo adequado e que expresse todo seu potencial, os nutrientes precisam estar em equilíbrio e nas quantidades adequadas. Pois, como observado por Pinheiro (2005), o fósforo quando em excesso, conduz a planta a fazer o pior aproveitamento do mesmo. Já que o excesso do nutriente induz a planta ao amadurecimento precoce, sem poder expressar o máximo do potencial, trazendo prejuízo a colheita.

O fósforo tem papel determinante nas principais funções vitais dos organismos, componente essencial para as principais substâncias orgânicas, sendo fundamental para a realização de processos sintéticos como: a biossíntese das proteínas, gorduras, amido e sacarose, que demandam grande quantidade de energia. Por exemplo, sem fósforo os vegetais não fazem fotossíntese e nem respiração.

As mensagens hereditárias que uma planta transmite para seus descendentes, numa semente ou numa gema, estão escritas com compostos muito complexo, o ácido desoxirribonucléico (DNA), que contém fósforo. O fósforo é importante na floração e frutificação, além de ajudar no desenvolvimento do sistema radicular. Faltando P, as folhas adquirem coloração verde azulada e depois apresentam tonalidades roxas, seguindo-se mais tarde, amarelecimento (MALAVOLTA 2002, p 12).

Por se tratar de um dos mais importantes nutrientes vegetais, o fósforo merece sempre atenção quando se planeja um cultivo. Como já visto, tanto sua falta quando seu excesso influenciam de forma negativa as colheitas. Portanto, o solo sempre deve ser trabalhado de forma que todos os fatores determinantes para sua disponibilidade estejam equacionados. Dentre os principais fatores, pH, matéria orgânica, atividade biocenótica, e disponibilidade do nutriente no solo.

#### **2.7.4 Transformações bioquímicas no solo**

Os processos naturais que regulam as transformações e fluxos de materiais na natureza são de grande valia, e aqueles mediados pela biota do solo merecem especial atenção. Estes podem significar importante passo para o planejamento do uso correto dos recursos naturais, especialmente aqueles não renováveis, como é o caso do P. Apostar nesta relação simbiótica é parte das estratégias de manejo do solo, afinal não se pode abrir mão de um recurso tão valioso quanto a biota do solo, especialmente quando o objetivo é um solo que expresse sempre o máximo de suas potencialidades.

Neste sentido convém observar o que afirma Moreira (2006).

O solo e a biota são componentes essenciais dos ecossistemas terrestres, onde os processos que garantem os chamados “serviços da natureza” como a ciclagem de energia e de elementos são de grande interesse ecológico e econômico (p. 313).

Fatores climáticos e as ações antrópicas junto aos ecossistemas naturais são as principais formas de interferência no ciclo do fósforo. Interferência mais aguda resulta da modernização da agricultura, a extração de fosfatos em larga escala, o processamento dos fertilizantes industrializados que são incorporados ao solo, contribui diretamente para que ocorram alterações no ecossistema. Estas intervenções alteram teores de pH e de nutrientes que, conseqüentemente, provocam grandes transformações bioquímicas no solo. Portanto, conhecer os processos que envolvem solo-planta, para a absorção de nutriente e suas interfaces e interações com os microrganismos precisam ser estimuladas através de um racional manejo do solo.

## 2.8 MICRORGANISMOS: ALTERNATIVAS PARA SUBSTITUIÇÃO AOS INSUMOS INDUSTRIALIZADOS

Os avanços das engenharias, da química, melhoramentos genéticos, defensivos, hormônios, estimulantes, cepas de microrganismos (fungos, bactérias e actinomicetos), são algumas das novas tecnologias aplicadas à agricultura, que começam a ganhar visibilidade neste momento em que a dependência externa de insumos necessários à elaboração de fertilizantes pode colocar em risco o abastecimento e a produção agrícola do país. Segundo França (2008), o país importa: para o caso dos fertilizantes nitrogenados 70%; fertilizantes a base de fósforo 50%; algo em torno de 90 % para os fertilizantes potássicos. (Apresentação do livro *Microrganismos e Agrobiodiversidade: o novo desafio da agricultura*).

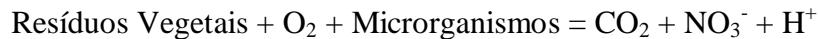
Diversos estudos em diferentes frentes têm sido desenvolvidos nos últimos anos, e a biotecnologia tem conseguido excelentes resultados em diferentes campos da ciência, sendo muitos deles direcionados à agricultura. Trabalhos voltados à solubilização de nutrientes minerais por microrganismos se encontram entre os que merecem destaque, especialmente aqueles capazes de aprimorar a disponibilidade de fósforo às culturas. Experimentos com cepas testadas em diversos compostos minerais, com várias fontes de matéria orgânica e faixas variadas de pH, vêm apresentando resultados, e foi verificado que vários tipos de microrganismos são capazes de solubilizar fontes minerais fosfatadas.

Diminuir a dependência externa de insumos industrializados, por conta da eficiência de cepas de microrganismos, pode representar importante salto da agricultura atual em direção ao futuro. O mundo anseia por produtos limpos e pela diminuição dos impactos ambientais e, neste sentido, a viabilização e uso das tecnologias vivas e limpas na produção primária e se estaria dando importante passo na direção de um futuro mais sustentável para a produção agrícola.

Aspectos não menos relevantes que a dependência externa de insumos para a confecção de fertilizantes é a dimensão continental do país, a pobreza de P lábil do solo em sua maior parte, e os custos da produção primária por conta dos elevados valores dos insumos, que no caso do Brasil são cotados no mercado internacional, sendo o país apenas tomador de preço.

### 2.8.1 Microrganismos na acidificação do solo

Os microrganismos que atuam na decomposição dos resíduos vegetais, também contribuem para a acidificação dos solos, a atividade de mineralização resulta na formação de substâncias húmicas, que podem contribuir para a acidificação do solo, conforme reação proposta por Meurer (2010, p.152).



Importante observar que quando ocorre à percolação do ânion nitrato, este obrigatoriamente, provoca o arraste de um cátion acompanhante, conseqüentemente, aumentando a acidez do meio. Segundo Meurer:

Havendo percolação do ânion nitrato no perfil, ocorre necessariamente o arraste de um cátion acompanhante ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), para manter a eletroneutralidade da solução do solo, permanecendo nas camadas mais superficiais do solo os íons  $\text{H}^+$ , acidificando mais o meio. Com a percolação destes cátions, os sítios de troca (CTC) são gradativamente ocupados pelo  $\text{Al}^{3+}$ , e, também, pelo  $\text{Mn}^{2+}$  em determinados solos (2010, p. 153).

Este fenômeno, conhecido como percolação, quando ocorre de acordo com o exposto acima, contribui para a acidificação do perfil superficial e ainda pode tornar o Al e o Mn em elementos tóxicos para as plantas.

Como são conhecidos pela Microbiologia e a Bioquímica do solo, os microrganismos atuam em varias faixas de pH, os fungos geralmente são mais adaptados a valores de  $\text{pH} < 5,0$ , as bactérias e actinomicetos (estreptomicetos, actinobactérias) e cianobactérias, a valores de pH entre 6 e 8. Portanto, estes valores não podem ser considerados como regra, temos exemplos de “bactérias autotróficas oxidantes de enxofre e ferro que toleram pH menor que 1,0” (*Thiobacillusferrooxidans*). Também se conhece alguns actinomicetos ácido-tolerantes. “A menor incidência de fungos em solos com pH entre 6 e 8 é, provavelmente, devida ao fato de que as bactérias e actinomicetos sejam competidores mais eficientes prejudicando, assim, o estabelecimento de fungos” (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006, p. 117).

A flutuação do pH provocada pela ação dos microrganismos, resulta de sua intensa atividade metabólica na decomposição dos resíduos orgânicos vegetais. Quando ocorre a degradação dos carboidratos há incremento de metabólitos ácidos e de  $\text{CO}_2$  no solo, estes reagentes promovem a diminuição do pH. Diminuição do pH, que, não necessariamente, deve ser vista como maléfica ao solo, visto que estes ácidos podem contribuir na

solubilização de nutrientes minerais. Processos semelhantes ocorrem com algumas famílias de plantas, que também produzem compostos ácidos que são liberados por seus exsudados na rizosfera.

### **2.8.2 Micorrizas**

Pode-se definir micorrizas como sendo uma associação mutualística entre fungos e raízes. Provavelmente a mais comum e mais importante das simbioses mutualística no reino vegetal. Estas associações benéficas ocorrem com plantas em quase todas as espécies vegetais, tanto silvestres como cultivadas, daí sua importância para a agricultura.

A importância da associação mutualística entre fungos e plantas está no fato destes microrganismos beneficiarem seus hospedeiros com uma maior absorção de água e nutrientes, especialmente o fósforo, macronutriente indispensável e fator limitante na produção vegetal. Outros nutrientes como zinco, manganês e cobre, também são absorvidos em maiores quantidades por plantas colonizadas com os fungos simbiotes.

Outro aspecto relevante desta relação é a ação protetora que espécies micorrízicas desempenham contra fungos e nematóides patogênicos encontrados no solo. “Em troca desses benefícios, o fungo recebe da planta hospedeira carboidratos essenciais para seu crescimento” (RAVEN et al., 2007, p. 308).

Quanto à forma de associação de fungos com as plantas na rizosfera, há dois tipos principais de colonização: as endomicorrizas, que penetram nas células da raiz, e as ectomicorrizas, que envolvem as raízes sem nelas penetrarem.

### **2.8.3 Endomicorrizas**

A colonização por fungos endomicorrízicos é a mais comum, ocorrendo em cerca de 80% das plantas vasculares, ou seja, aquelas que apresentam vasos condutores de seiva (xilema e floema). As hifas destes fungos penetram nas células corticais das raízes das plantas, onde formam estruturas intensamente ramificadas, chamadas arbúsculos. Os arbúsculos causam invaginação na membrana plasmática da célula colonizada, e o aumento da superfície desta célula facilita a troca de metabólitos e nutrientes entre fungo e hospedeiro. O conjunto de hifas forma o micélio, que estabelece intensa relação com a parte externa das células e da raiz, penetrando no solo circundante por vários centímetros, o que aumenta substancialmente a absorção de água, fosfatos e de outros nutrientes essenciais a nutrição vegetal (RAVEN, et al., 2007).



Quando se trata de microrganismos endófitos, sabe-se até o presente momento que estes colonizam todos os tipos de plantas. Possuem o hábito de colonizar sistematicamente as plantas, e depois desta colonização os microrganismos podem alterar as condições fisiológicas e morfológicas do hospedeiro. Também podem atuar sobre outros hospedeiros que já colonizavam a planta, e desta colonização pode resultar benefícios para a planta ou também problemas fitossanitários, especialmente em situações de estresse.

A microbiologia molecular têm se ocupado de aperfeiçoar e consolidar os conhecimentos a respeito dos processos interativos que permeiam as relações entre vegetais e os microrganismos. Conforme Andreote (2008, p. 242). “Nos últimos anos, novas abordagens metodológicas, principalmente a da biologia molecular, têm sido muito úteis na geração de um quadro mais completo sobre as interações microbianas”. Esta nova técnica permitirá acompanhamento em tempo real do comportamento das comunidades microbianas endofíticas, e permitirá que sempre se avance na compreensão destas relações, simbioses ou não.

Uma das colonizações mais conhecidas e também das mais importantes para a agricultura e a colonização das raízes de plantas ainda jovens, provocada pelas bactérias do gênero rizóbio, que se associam principalmente as raízes das leguminosas dando a estas condições de adaptação em solos pobres em compostos nitrogenados. Conforme Amabis:

As bactérias estimulam a multiplicação das células infectadas, o que leva à formação de tumores, denominados nódulos. Graças à associação com os rizóbios, por sua vez, também se beneficiam com a associação, pois utilizam como alimento substâncias orgânicas fabricadas pela planta. Ao morrer e se decompor, as plantas leguminosas liberam, em forma de amônia, o nitrogênio de suas moléculas orgânicas, fertilizando o solo (p. 308, 2008).

#### **2.8.4 Ectomicorrizas e obtenção de nutrientes a partir de rochas**

As relações simbióticas estabelecidas com os fungos deste grupo ocorrem na superfície externa das raízes. Estes microrganismos colonizam as raízes, atraídos principalmente pelos açúcares exsudados e, a partir desta colonização, desenvolvem intensa relação de troca com a planta. Estes fungos apresentam uma capacidade muito grande de ramificação de suas hifas, o que vai proporcionar às raízes uma excelente proteção contra situações extremas, principalmente, frio e estresse hídrico. O micélio forma uma bainha, também chamada manto fúngico, que proporciona grande conforto e estabilidade à rizosfera. Ainda, a capacidade de ação do micélio nas imediações das raízes estimula a solubilização de nutrientes minerais por conta dos ácidos orgânicos excretados

pelo fungo. Esta ação constitui uma das formas mais eficientes de solubilização/absorção de fosfatos das relações micorrísticas. A esta atividade biocenótica se deve uma das formas mais eficientes para o suprimento de P às plantas, quando o  $P_i$  encontrado na forma de P-não lábil do solo é transformado em P solúvel.

Na busca por isolados de fungos ectomicorrízicos capazes de obter nutrientes em condições adversas, pesquisas procuram associar a capacidade de adaptação e resposta simbiótica do microrganismo a algum fator de interesse nas plantas. Os fungos solubilizadores de P estão entre estes. Em condições naturais, grande parte dos solos brasileiros é deficiente em P, e uma estratégia para melhorar este cenário é a utilização do pó de rocha, que consiste na aplicação de materiais em estado natural, apenas moídos, sobre o solo. A disponibilidade de vários minerais é estimulante à biocenose.

Este material vai estimular a capacidade restauradora do solo, o pó de rocha associado à atividade microbiana, como observado por Oliveira, desempenha importante papel:

Um dos aspectos mais estudados atualmente em relação à associação ectomicorrizica é a capacidade de obtenção de nutrientes a partir de rochas. Dos fertilizantes mais utilizados, o P e o K mostram-se os mais limitantes para a produção vegetal, devido a problemas de fixação no solo ou de lixiviação, respectivamente. A utilização de rochas moídas na agricultura é uma técnica moderna, usada em países de agricultura evoluída como restauradora de solos e supridora das necessidades das plantas. Contrariamente aos fertilizantes solúveis, as rochas moídas não agredem o meio ambiente e ainda preservam e estimulam a atividade da microbiota. Além disso, não acidificam nem salinizam o solo, promovem o aumento do pH, proporcional a liberação lenta e gradual de seus nutrientes, apresentando, dessa forma, maior efeito residual que os fertilizantes solúveis, evitando a absorção de luxo, bem como a fixação e a lixiviação. (Alves, 2006; Oliveira et al., 2008)

Apesar de seu potencial, a “rochagem” em substituição a técnicas convencionais para fertilização, tem apresentado resultados contraditórios. Tais contradições parecem residir na baixa solubilidade desses materiais, o que requer o desenvolvimento de processos que proporcionem uma maior liberação de nutrientes. Como observado, vários estudos enfatizam a importância dos microrganismos para a solubilização dos nutrientes encontrados nas rochas.

Os microrganismos do solo sintetizam milhares de metabólitos que atuam nas interações microbianas e no crescimento e desenvolvimento das plantas. São conhecidos mais de 10.000 produtos de interesse comercial como, fármacos, toxinas, fitorreguladores, agentes de biocontrole, enzimas e polissacarídeos (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006, p.244).

Importante observar que os microrganismos coevoluíram com as plantas, e que neste processo de coevolução ambos foram se beneficiando. Os registros fósseis sugerem que os ectomicorrizas evoluíram do seu hábito saprófito, para o simbiote, a partir do qual aprimoraram sua relação com os vegetais. Também é sugerido que esta evolução se deu em condições de pouca fertilidade de solo, razão pelas quais muitos micróbios apresentam eficiência para a solubilização de nutrientes minerais. Estas simbioses contribuíram para a expansão de algumas florestas a exemplo da família Pinaceae (OLIVEIRA, 2008).

Aspectos relevantes da aplicação de ectomicorrizas também estão associados a várias condições e fatores, tais como: recuperação de áreas degradadas, condições de estresse hídrico, teores de fósforo no solo, a utilização de fontes orgânicas de nitrogênio, adaptação de plantas em local diverso daquele de origem dentre outros. Muito usado na introdução de cultivos de interesse silvicultural, especialmente o *Pinus*. Diversos estudos apontam para um maior rendimento das culturas silvícolas quando inoculados com fungos ectomicorrízicos. “As qualidades mais desejadas para a seleção de fungos ectomicorrízicos são a capacidade de se associar à planta de interesse e a capacidade de promover o crescimento das mudas além da capacidade de crescer em condições de cultivo industrial” (OLIVEIRA, p. 299, 2008).

Em condições de estresse hídrico, o micélio externo que emana da micorríza, por sua ação microcapilar tem acesso a microssítios do solo, desempenhando importante função de acesso a água, vantagem que pode ser decisiva principalmente na implantação de culturas silvícolas. Para o sucesso de um programa de inoculação alguns aspectos são relevantes, o inoculante deve ser adequado para o transporte e armazenamento, para que mesmo após algum tempo de armazenagem seja eficaz na infecção da raiz. É importante também a qualidade microbiológica do inoculante, e que o mesmo seja isento de patógenos que venham a comprometer o controle fitossanitário da cultura, ainda o preço deve ser compatível. Os inoculantes ectomicorrízicos têm sido obtidos de várias formas, alguns são constituídos do próprio solo das florestas ou plantações, enquanto outros são produzidos em biorreatores a partir do micélio fúngico. Entre estes extremos há ainda os inoculantes obtidos da frutificação de esporos coletadas em plantações anteriores (OLIVEIRA, 2008).

Diante da diversidade de possibilidades de uso, a microbiologia, conjuntamente com a biotecnologia, tem pela frente uma fronteira enorme a ser desvendada, quando se trata de conhecer o potencial que os microrganismos do solo apresentam, é consenso entre pesquisadores que há muito a ser descoberto.

### **2.8.5 Solubilização de fontes inorgânicas de fosfatos em meio sólido e líquido**

Alternativas para a substituição de minerais solúveis de base fosfáticas e potássicas, os pós de rochas apresentam em suas composições significativos teores de fosfatos e potássio, sendo encontradas em quantidades razoáveis em solos brasileiros, e abrindo caminho para uma potencial sustentabilidade de longo prazo. A fertilização com fosfatos e potássios naturais inoculados com cepas de microrganismos especializados para a solubilização já vêm sendo estudados e prometem viabilidade e sustentabilidade.

A comunidade científica, conjuntamente com órgãos governamentais, têm investigado e aprimorado técnicas e métodos para que cepas de microrganismos já identificadas como solubilizadoras ganhem visibilidade e viabilidade a campo.

As possibilidades de solubilização das fontes fosfáticas por microrganismos a partir de vários métodos e meios tais como a presença de fontes de fosfatos inorgânicos e carbono em diferentes tipos de cultivo (meios sólidos e líquidos), têm apresentado resultados promissores. Como observado por Silva Filho (2000), a solubilização de fontes inorgânicas (Ca-P, Al-P e Fe-P) por microrganismos na presença de diferentes fontes de carbono (celulose, amido, sacarose, glicose, frutose e xilose), permite avaliar o desempenho das cepas de bactérias e fungos cultivados em meio de cultura (glicose-extrato de levedura) e selecioná-los de acordo com sua aptidão e eficiência.

Pesquisa utilizando 57 microrganismos (15 bactérias e 42 fungos) isolados de amostras de solo de pomares (macieira, pessegueiro e videira) e florestas (*Pinus* e *Eucalyptus*) foi realizada para verificar o potencial solubilizador de fosfato em meios sólidos (Silva Filho 2000). Cinquenta e seis isolados foram capazes de solubilizar fosfato de cálcio, com destaque para isolados do gênero *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Penicillium*, e *Paecilomyces*. Contudo foi observada baixa incidência de microrganismos que solubilizam fosfatos de alumínio (5 isolados), enquanto que nenhum foi capaz de solubilizar fosfato de ferro, o que encontra suporte na literatura, porém, é suscitado que esta baixa incidência pode estar associada à origem dos procedimentos de isolamento.

Conforme Silva Filho:

Inicialmente, os isolados são obtidos a partir do crescimento e formação de halo de solubilização, em meio de cultura com fosfato de cálcio. Somente após este primeiro estágio, e que os isolados são testados nos fosfatos de alumínio e de ferro. Essa ordenação dos procedimentos de isolamento pode levar à maior seletividade de microrganismos capazes de solubilizar fosfato de cálcio em detrimento de fosfato de alumínio e de ferro (2000, p.315).

Segundo o autor, poucos trabalhos estão sendo realizados para avaliar a capacidade e o potencial de solubilização na presença de diferentes fontes de carbono e fósforo. As pesquisas apresentam resultados controversos, sendo que as informações obtidas são com microrganismos isolados, em sua maioria, de regiões de clima temperado, e os experimentos desenvolvidos na presença de glicose e fosfato de cálcio.

Conforme Silva Filho (2000), os resultados observados nas diversas fontes de fosfatos “parecem indicar certa regularidade entre os isolados do mesmo gênero. Os isolados de *Penicillium* apresentaram potencial superior ou igual aos de *Pseudomonas* que por sua vez, foram superiores as de *Bacillus*, e estes aos de *Aspergillus*”. (2000, p. 315).

Ainda segundo autor, para melhor compreensão destes resultados, é necessário avaliar as condições do meio e dos métodos utilizados na determinação da solubilização do fosfato, além da espécie utilizada. Mesmo com variação dos resultados encontrados nos diferentes estudos e épocas, nenhum deles diminui a importância das pesquisas com os microrganismos para a solubilização de nutrientes minerais, sejam os naturalmente encontrados no solo em formas não-lábeis, ou acrescidos através de fontes de fosfatos e potássicos com o uso da “rochagem”.

### **2.8.6 Fontes de carbono (comportamento de isolados)**

Com relação aos isolados testados nas diversas fontes de carbono (celulose, amido, sacarose, glicose, frutose e xilose), foi observado que todos eles cresceram em meios de cultura, porém, alguns não solubilizaram fosfatos em nenhuma das condições experimentadas. Conforme a fonte de carbono adicionada, a solubilização foi variável. Observou-se pouca solubilização na presença de amido e, utilizando celulose como fonte de carbono, não foi observada solubilização de fosfatos. Este fato pode estar relacionado ao tempo de incubação, Segundo Silva Filho.

O tempo de 72 h de incubação utilizado no experimento pode ter sido insuficiente para a formação de enzimas que hidrolisam a celulose e, portanto, não permite afirmar que microrganismos solubilizadores de fosfatos na presença de celulose não tenham capacidade de solubilizar (2000, p. 316).

À exceção da celulose, fonte de carbono com a qual não ocorreu solubilização de fosfatos, diferentes comportamentos quanto às fontes de carbono tem sido encontrada na literatura, com variações na solubilização e no crescimento de *Aspergillus niger*. O crescimento foi maior em meio com glicose, sacarose e amido. Convém lembrar que todas

estas fontes de carbono são encontradas no solo quando este apresenta elevado teor de matéria orgânica contribuindo efetivamente para sua fertilização, e que este sendo um sistema aberto está sujeito a infinitas interações.

Seguindo a linha de raciocínio de Khatounian (2002), que entende a fertilidade do solo não apenas por seus elementos químicos, mas, a partir de uma abordagem sistêmica, um pensar orgânico, conceitos de ecologia, agronomia e de fatos agrícolas diferentes da agricultura convencional, enfatizar formas mais adequadas e sustentáveis para a substituição dos insumos agrícolas e apontar para um conjunto dinâmico integrado e harmônico de elementos essenciais para sua autofertilização, faz entender que a fertilidade não está no solo, nem nas plantas, nem nos animais, mas no seu conjunto dinâmico, integrado e harmônico, que se reflete em boas propriedades no solo, boa produção vegetal e boa produção animal.

Quando ocorre a perturbação deste dinamismo, a fertilidade decai; ao contrário se convenientemente manejados, a fertilidade é incrementada. Considerando o exposto, é necessário pensar alternativas para a agricultura, não somente alternativas para a substituição de insumos convencionais industrializados. Mesmo contando com várias alternativas tecnológicas, para suprir as demandas fisiológicas das plantas e dos animais, não podemos esquecer que, cada elemento faz parte de um todo e precisa estar minimamente harmonizado para que o sistema funcione e mantenha sua fertilidade.

### **2.8.7 Matéria orgânica e microrganismos**

A ideia convencional, tão preconizada para a fertilização do solo, pode ser questionada. Esta concepção de que tudo se resolve com insumos químicos, precisa ser superada. Quando buscamos por alternativas sustentáveis, ao promover a fertilização do solo não podemos esquecer o caminho da fotossíntese, e a intensa relação da planta com os microrganismos do solo. Os processos pelos quais as plantas produzem matéria orgânica a partir de substâncias que estão na atmosfera e da água do solo ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ), sua transformação em carboidratos e distribuição para as partes da planta via floema, especialmente para as raízes, resulta na liberação de exsudados na forma de glicose e ácidos orgânicos, que vão atrair para junto da rizosfera uma infinidade de microrganismos

capazes de atuar simbioticamente, promovendo interação positiva para a solubilização de nutrientes essenciais às plantas, a exemplo do fósforo.

A matéria orgânica, importantíssima para as atividades macro e microbiológicas no solo, não pode ser minimizada, quando se discute alternativas para, a solubilização de nutrientes via microrganismos simbiontes presentes no solo.

Pode-se dizer, que:

A matéria orgânica desempenha muitos papéis importantes, todos significativos para a agricultura sustentável. ...fonte mais óbvia de nutrientes para o crescimento das plantas, ela constrói, promove, protege e mantém o ecossistema do solo. ... à matéria orgânica do solo é um componente chave da boa estrutura, aumenta a retenção de água e nutrientes, é a fonte de alimento para os microrganismos do solo, e fornece proteção mecânica para a superfície. (GLIESSMAN, 2000, p. 228).

Na medida em que vamos compreendendo a natureza da matéria orgânica, das propriedades minerais contidas nos pós de rochas, a capacidade solubilizadora dos microrganismos, começa a evidenciar-se que, este pode ser o caminho para a substituição dos insumos industrializados na agricultura, em especial os fosfatos e potássios solúveis.

Agentes propulsores na reciclagem e solubilização de nutrientes orgânicos e minerais, os microrganismos habitantes dos mais diferentes nichos ecológicos, associados a princípios e métodos naturais, podem dar respostas satisfatórias para o pertinente problema da dependência externa dos insumos agrícolas.

Quando buscamos na literatura agrônômica tecnologias alternativas para a substituição dos insumos, somos conduzidos a pensar diferente. As relações solo/planta/organismos e o próprio homem ganham outro significado. Percebe-se que há incompatibilidade entre a forma de produzir insumos da maneira convencional com uma que se apresente alternativa.

Para a primeira, que faz uso dos complexos processos químicos industriais, que por sua vez têm o petróleo como principal ingrediente para o processamento da matéria prima, esta, por certo, apresenta limitações, principalmente, no momento em que se discutem projetos sustentáveis e uso de fontes renováveis ou de menor impacto ambiental. Ainda, este modelo tecnológico conhecido como convencional, apenas considera para o suprimento das demandas nutricionais as necessidades químicas minerais das culturas, ou seja, o conjunto de macro e micronutrientes tradicionalmente conhecido, não levando em conta, aspectos de uma abordagem sistêmica mais ampla.

A busca por formas alternativas visando à substituição dos insumos convencionais nos instiga a fazer correlações entre as várias correntes de agricultura, onde cada fator deve ser compreendido como parte de um sistema interligado, considerando os mais variados aspectos agronômicos. Neste contexto, merecem destaque as populações microbianas que coevoluem com as espécies vegetais, atuando por vezes na rizosfera, promovendo a fixação simbiótica do nitrogênio ou na solubilização dos nutrientes minerais. Outras como endófitos, microrganismos que colonizam os tecidos internos das plantas, sem causar danos aparentes ao hospedeiro e sem produzir estruturas externas visíveis (Azevedo et al., 2000), que são descritos também como agentes que atuam como reguladores produzindo substâncias auxiliadoras na resistência ou promotora de crescimento, podendo também, em situações de estresse tornarem-se patogênicas.

O sucesso na busca de alternativas para a substituição de insumos industrializados requer a mudança de algumas concepções em relação à forma de produção. Os microrganismos do solo, apesar de pouco conhecidos, desempenham importante papel na solubilização dos nutrientes essenciais às plantas. Solos com teores elevados de material orgânico normalmente apresentam alta capacidade de produção, evidenciando a importância desta e suas complexas relações com o sistema.

Para Khatounian (2002), um bom teor de matéria orgânica desencadeia uma série de fatores, que combinados, melhoram a capacidade de armazenamento de água, da oxigenação do solo, contribuindo para uma temperatura mais estável e adequando o pH na rizosfera agrícola, colaborando para uma melhor sanidade dos vegetais e absorção dos nutrientes minerais. As plantas em condições favoráveis intensificam suas relações com a fauna microbiana do solo.

Todas essas melhorias são mediadas primariamente pela ação dos organismos cujos nichos estão na interface solo-atmosfera (mesofauna), e em segundo lugar pelos microrganismos que vivem no corpo do solo. Para os organismos da mesofauna, em poucos meses já se pode apreciar o resultado do seu trabalho, desde que haja palhada para alimentá-los. Para os microrganismos do corpo do solo, o tempo varia de alguns meses a alguns anos dependendo do efeito que se esteja medindo (KHATOUNIAN, 2002, p.29).

A biomassa vegetal dinamiza uma intensa atividade macro e microbiológica nos solos, constituindo-se em elemento central na fertilidade do sistema “A vida do solo – sua atividade biológica, junto com a vegetação, forma um conjunto que processa sem parar os recursos naturais básicos disponíveis: sol, água e nutrientes”(IPÊ, 2002, p. 20). É um reciclar permanente de carbono, de hidrogênio, de oxigênio, somado a minerais encontrados na matriz do solo ou acrescido pela “rochagem”.



Quando se fala em alternativas para a substituição de insumos agrícolas, este é um assunto que carece de muita pesquisa. Como vimos, a matéria orgânica e a atividade microbiana estão intimamente ligadas. No entanto, acredita-se que sejam conhecidas apenas 1% dos microrganismos do solo. Mesmo assim, já é possível afirmar que várias cepas de fungos, bactérias e actinomicetos têm potencial para a solubilização dos principais nutrientes minerais demandados pelas culturas agrícolas, conforme demonstrado nos experimentos desenvolvidos com diferentes fontes de fosfatos e potássio.

### **2.8.9 Solubilização de pós de rochas**

Uma rica atividade biocenótica no solo, que tenha por base significativo teor de matéria orgânica, terá nos microrganismos o ingrediente ativo para a reciclagem, a mineralização e a solubilização dos nutrientes minerais. Portanto, um elevado conteúdo de material orgânico, complementado com pós de rochas ricos em fosfatos e potássio, e a inoculação de cepas de fungos e bactérias especializados para a solubilização destes nutrientes, podem ser a chave para a pertinente questão da dependência externa dos insumos agrícolas. A aplicação de pó-de-rocha como fertilizantes em ambientes tropicais, quando comparada com a aplicação em ambientes de clima temperado, tem muitas vantagens, destacando-se a taxa de dissolução das rochas e dos minerais, e a reação entre superfícies minerais e a solução do solo, que são intensificadas em função da temperatura e da umidade (ASSAD et al., 2006).

Destaca-se ainda que diversos grupos de microrganismos, como as bactérias, fungos e actinomicetos, têm a capacidade de solubilizar potássio em minerais silicatados por meio da decomposição. Portanto, em condições naturais e com manejo adequado do solo, os processos de liberação de nutrientes do pó-de-rocha para a solução do solo na forma adequada para serem absorvidos pelas plantas, ainda podem ser lento.

*Aspergillus niger* que tem sido descrito como sendo eficiente na solubilização de rochas fosfáticas, graças à produção de ácidos orgânicos, e também tem se mostrado capaz de solubilizar o potássio, como constatado em experimento com rochas: uma ultramáfica alcalina coletada em Lajes (SC), e outra um flogopitito coletada em Carnaíba (MG). O uso de *A. niger* via processo biotecnológico tem se mostrado promissor para a solubilização do potássio com resultados mais expressivos a rocha ultramáfica alcalina.

Apesar do flogopitito apresentar um conteúdo maior de  $K_2O$  superior ao da rocha ultramáfica alcalina, ao final do ensaio a quantidade de potássio liberado foi maior no ensaio com ultramáfica alcalina do que com o flogopitito. Isto se deve a mineralogia destas duas rochas. Os flogopitito utilizados neste ensaio, provenientes de Carnaíba na Bahia e intimamente associados à ocorrência de esmeralda, e praticamente monomineralico (Giuliani & Couto, 1988), formado pela mica flogopita com alto teor de sílica (mais de 47% de  $SiO_2$ ). Por outro lado, a rocha ultramáfica alcalina, é um Kimberlito de mineralogia complexa que provavelmente possui em sua composição, além da mica flogopita, minerais como olivina, carbonatos e piroxênios, que lhes conferem uma taxa de solubilização mais rápida (ASSAD, 2006, p.8).

A solubilização do potássio em pó deflogopitito e rocha ultramáfica alcalina por *Aspergillus niger*, segundo constatação dos autores, tem grande potencial, pois é de baixo custo, e de alta eficiência. Foi constatado que a acidificação provocada pelo *A. niger* aumentou a taxa de solubilização de K contido nos minerais estudados (rocha ultramáfica alcalina, contendo 3,32% de  $K_2O$ ) e (rocha flogopita, contendo 5,13 de  $K_2O$ ). No final de 21 dias do experimento, o total de K solubilizado foi maior no tratamento do fungo com rocha ultramáfica alcalina (1,52 cmolc/dm<sup>3</sup>) do que com flogopitito (0,52 cmolc/dm<sup>3</sup>).

Ainda, segundo os autores:

O estudo deve prosseguir objetivando o aperfeiçoamento de métodos para a aplicação efetiva desta tecnologia, por meio de testes de outros microrganismos, outros meios de cultura e outros pós-de-rochas, com a avaliação destes em biorreatores para efetivar o aproveitamento desta tecnologia na fertilização dos solos brasileiros (ASSAD, 2006, p.13).

Fica claro que os microrganismos apresentam potencial alternativo para a substituição dos insumos químicos de alta solubilidade. *A. niger*, frequentemente citado como solubilizador de fosfatos, pode também apresentar capacidade para a solubilização de pós-de-rochas potássicas. Como sugerem os autores, se fazem necessários muitos testes com outros tipos de microrganismos, já que praticamente todos os tipos de solo apresentam cepas microbianas capazes de responder à solubilização de nutrientes em condições naturais.

Neste contexto, convém observar Araújo, que diz:

A população microbiana do solo, especialmente a rizosférica, que ocorre na interface solo-raiz, e a planta, e a endofítica, que vive dentro do tecido vegetal sem causar dano à planta, constituem uma das principais fontes bióticas de grande importância para o crescimento e sanidade da planta. Isso ocorre pelo fato de a população microbiana estar envolvida na decomposição da matéria orgânica, na mineralização, solubilização e mobilização de nutrientes, favorecendo e disponibilizando os mesmos para serem absorvidos pelas raízes (Alexander, 1971). Essa interação planta-microorganismo é responsável por grande impacto na funcionalidade do solo melhorando a produtividade agrícola (2008, p. 278).

Muitos são os aspectos positivos promovidos pelos microrganismos do solo. Quando associados a bons teores de material orgânico beneficiam as plantas, aspecto que é pouco relevante para a indústria de insumos agrícolas, que através dos recursos da química, procuram suprir todas as demandas da fisiologia vegetal, sem levar em consideração a complexidade que é este sistema.

#### **2.8.10 Fixação simbiótica e reciclagem de nutrientes**

O uso adequado de espécies vegetais em consórcio ou rotação de culturas potencializa a fixação do nitrogênio atmosférico e a ciclagem de nutrientes minerais que são encontrados nas camadas agricultáveis do solo. Quando em condições ideais de material orgânico e atividade biocenótica podem dar respostas muito satisfatórias em termos de fertilidade do solo. A rotação de plantas de cobertura verde com as culturas principais contribui para a elevação dos baixos teores de matéria orgânica da maior parte dos solos agrícolas no Brasil, ingrediente primordial para uma intensa atividade biocenótica, que conseqüentemente, atua no melhoramento solo sob todos os aspectos, especialmente, a reciclagem do potássio, que tende a lixiviar em condições de pouca estrutura e solo pobre em matéria orgânica.

A estes fatores, ainda pode ser incrementada a “rochagem”, e a inoculação de cepas de microrganismos especializados na solubilização e fixação simbiótica de nutrientes essenciais.

A cultura da soja, produzida em larga escala no Brasil, é considerada, pela fixação biológica do nitrogênio, um dos sistemas mais sustentáveis do mundo.

O uso das bactérias fixadoras de Nitrogênio em associação à prática de plantio direto e, conseqüentemente, da importância que se dá a produção e acumulação da matéria orgânica, faz com que o cultivo da soja no Brasil possa ser considerado um dos sistemas mais sustentáveis da agricultura moderna e objeto de admiração por todos os países, sejam eles desenvolvidos ou em desenvolvimento (FRANÇA, 2008,p.6)

(Apresentação do Livro Microrganismos e Biodiversidade).

Ao analisar a eficiência das bactérias fixadoras de nitrogênio para o caso da soja, quando se abdica o uso de nitrogênio mineral, a biotecnologia, obrigatoriamente se apresenta como possibilidade real dentre as alternativas praticáveis e viáveis para a Nova Agricultura. Dentre estas alternativas, a microbiologia poderá atuar decisivamente na

substituição de insumos industrializados. Fazer referência à cultura da soja, onde milhões de hectares são cultivados sem nenhuma dependência de nitrogenados minerais, é algo bastante estimulante para novas pesquisas e para que se amplie esta eficiência para outras culturas.

É importante destacar ainda que em países como Argentina e Estados Unidos também ganhou notoriedade o uso de cepas de microrganismos promotores de crescimento para gramíneas, enquanto no Brasil, somente agora se inicia, de forma mais consistente, a liberação de cepas e produtos aplicáveis aos milhões de hectares cultivados com milho, trigo, arroz e cana-de-açúcar (FRANÇA, 2008). Essa tecnologia alternativa pode apresentar ampla capacidade para atender as demandas por nutrientes responsáveis pelo crescimento dos vegetais, em substituição ao nitrogênio mineral.

Ainda segundo França:

A ação hormonal, associada à produção de ácidos húmicos responsáveis por facilitar a disponibilização dos nutrientes aos sistemas radiculares e a própria fixação não-simbiótica de Nitrogênio, podem contribuir de forma tão efetiva ou ainda maior do que tem feito até o momento a aplicação das bactérias fixadoras de Nitrogênio em leguminosas (2008, p.6).

A grande dependência externa por insumos, mudanças climáticas, práticas agrícolas não sustentáveis, desertificações, demandas crescente por alimentos, fontes de energia não renováveis, extensão das terras agricultáveis, dentre outras, são algumas das razões pelas quais a pesquisa para o desenvolvimento da biotecnologia e o uso de microrganismos solubilizadores e fixadores de nutrientes, produtores de enzimas e hormônios, merecem serem tratadas como de soberania nacional.

Levando em conta a dimensão territorial, as quantidades de nutrientes necessárias, o custo, a logística, as condições climáticas do Brasil, a promoção e o desenvolvimento de alternativas que dêem preferência à biomassa vegetal como a fonte primária na produção de matéria orgânica, para que ocorra a ativação da grande máquina biocenótica que habita o solo e a rizosfera (especialmente a camada agricultável do solo), não podem deixar de figurar entre as alternativas para a substituição dos insumos industrializados. A elevação dos teores da matéria orgânica do solo e o manejo menos agressivo ao sistema tornam possíveis importantes incrementos na atividade microbiológica do solo. A adição de fosfatos e potássicos naturais através dos pós-de-rochas sobre um solo com intensa biocenose poderá dar resultados satisfatórios em termos de solubilização e disponibilidade

dos principais nutrientes minerais às plantas, especialmente, quando inoculadas com cepas microbiológicas desenvolvidas e especializadas para tal fim.

O aspecto de maior relevância e alternativo aos insumos industrializados neste contexto é a contribuição dos microrganismos através da inoculação de cepas de fungos, bactérias e actinomicetos com potencial para solubilização de fosfatos e potássicos a exemplo da fixação simbiótica do nitrogênio no caso da soja e leguminosas em geral. A biotecnologia e a microbiota do solo pode atuar, assim, a serviço da humanidade e por uma agricultura sustentável.

## 2.9 EUTROFIZAÇÃO DAS ÁGUAS

A eutrofização das águas, problema comum em algumas regiões da Europa, Estados Unidos e China, começa a ganhar importância no Brasil. Para que ocorra este fenômeno, ou seja, o enriquecimento de um corpo d'água com nutrientes (especialmente, o nitrogênio e o fósforo), estes precisam ser transportados dos solos agricultáveis onde se encontram para os corpos d'água. Estes nutrientes promovem o desenvolvimento acelerado de alguns microrganismos, principalmente algas e cianobactérias, consideradas potencialmente problemáticas para os recursos hídricos. As cianobactérias e as algas por concentrarem seu crescimento na lâmina d'água, acabam dificultando a troca de gases entre a água e atmosfera provocando a mortandade de peixes, gado e outros animais, devido à ingestão de toxinas que são produzidas quase que exclusivamente por elas.

As criações concentradas de suínos, também apresentam potencial para enriquecimento da água com nutrientes e matéria orgânica. Os esterco líquido em solos com pouca estrutura são facilmente carregados pela água quando ocorre erosão laminar, e o P orgânico contido nestes materiais, por sua vez, acaba indo para os mananciais superficiais. O N, embora menos problemático que o P, também se encontra em quantidades razoáveis neste tipo de matéria orgânica.

Já que alguns microrganismos da biota aquática podem fixar nitrogênio do ar, este nutriente não é limitante para a proliferação dos mesmos, daí que o fósforo acaba por ser o grande vilão da eutrofização, e por consequência, a alta proliferação de alguns microrganismos causadores de enormes danos ambientais, econômicos e à saúde, mediante a deterioração de recursos hídricos.

Região com grande concentração de animais confinados, o Sul do Brasil, é um dos pólos da suinocultura, criação expressiva e importante atividade econômica com complexo

parque agroindustrial, já apresenta municípios com solos saturados para a capacidade de absorção de dejetos. Criações que combinam grande produção de dejetos orgânicos com altos teores de P, quando mal manejados, acabam chegando aos mananciais superficiais. Muito utilizado para a fertilização do solo, os dejetos são considerados um problema ambiental. Conforme Berwanger (2008):

(...) entre os elementos químicos dos dejetos de suínos, o P tem importância nutricional para as plantas e a biota quando o solo é deficiente, mas também pode ser um poluente, quando transferido aos mananciais de água superficial e, ou, subsuperficial (p. 2526).

Problema considerado inexpressivo na agricultura brasileira, a eutrofização das águas, pode ocorrer pela grande carga dos dejetos domésticos que em muitas cidades são escoados via fluvial. A grande concentração de suínos no Oeste de Santa Catarina é um exemplo de que, os dejetos quando mal manejados nos criatórios, ou carreados das lavouras para pequenos cursos d'água, lagos, açudes, apresentam grande capacidade de alteração destes ecossistemas, ocasionando proliferação de algas, representando grande dano nestes ambientes.

A erosão hídrica, consequência de mau manejo do solo e da falta de coberturas, configura-se como a principal forma de transporte de nutrientes minerais e C orgânico dos solos agricultáveis para os mananciais. Segundo Bertol:

(...) os quais poderão contaminar as águas em mananciais de superfície, entre outros ambientes. Um dos principais impactos é causado pelo P, que, apesar de se encontrar em pequena quantidade na maioria dos solos brasileiros, é considerado elemento chave para ocorrência da eutrofização das águas de superfície (2011, p.1423).

A eutrofização da água pelo uso intensivo de fertilizantes químicos, também parece distante. Porém, para Novais:

(...) perdas de P de áreas cultivadas com adequado controle de erosão, embora sejam mínimas em termos econômicos, quando significam ganhos para os ambientes aquáticos, podem ser desastrosas. O crescimento de certos tipos de "algas azuis" (ciano-bactérias) nessas condições pode causar a produção de neuro e hepatotoxinas, sem alterar gosto e odor, criando problemas para o tratamento dessas águas para o consumo humano. Essas toxinas têm causado a morte de animais nas fazendas que consomem águas contaminadas. Morte de pacientes submetidos à hemodiálise, utilizando água com essas toxinas, mesmo quando submetidas aos processos de tratamento convencional, ... (2007, p. 525).

Os solos brasileiros geralmente apresentam baixos valores médios de P-lábil e altos valores de FCP, limitando a desorção de P desses solos, diante disso, fica restringida a presença de P reativo-solúvel (PRS). Portanto, há pequeno risco de contaminação das

águas superficiais e subterrâneas. Porém, atividades agrícolas intensivas como a olericultura, quando utiliza altas quantidades de dejetos e outros materiais orgânicos, representa potencial contaminante e conseqüentemente provocando a eutrofização da água, mesmo que localizada (NOVAIS, 2007).

### 3 CONCLUSÃO

Este trabalho de revisão bibliográfica teve por objetivo discutir alternativas para a solubilização de fosfatos por microrganismos. Para viabilizar o objeto de estudo foi necessário contextualizar os principais aspectos sobre do ciclo biogeoquímico do fósforo, e suas formas de ocorrência na natureza. Procurou-se apresentar os principais países produtores de fosfatos e onde estão às maiores reservas (jazidas) de P, bem como a situação brasileira neste cenário. O Brasil figura entre os países que mais importam fosfato para a produção de fertilizantes. Com dimensão continental, solos intemperizados e vocação agrícola, o país precisa acompanhar de perto as questões que envolvem os fosfatos. O intemperismo provocou grandes perdas de fósforo no solo brasileiro, tratando-se de um nutriente com pouca presença na maioria dos solos cultivados.

Procurou-se explicitar a dinâmica do fósforo no solo e sua estreita relação com o intemperismo, as principais formas de ocorrência e fatores facilitadores ou que dificultam sua absorção pelos vegetais. Entre estes fatores estão o intemperismo, o pH, a disponibilidade de fósforo no solo, toxidez de alumínio, ferro e manganês, a matéria orgânica e a ação dos microrganismos na rizosfera.

A importância de se conhecer os processos simbióticos, que resultaram da coevolução de vegetais e microrganismos para o suprimento mútuo de nutrientes. A fixação simbiótica de nitrogênio por rizóbios em leguminosas é um dos melhores exemplos disso, e faz a produção de soja no Brasil ser uma das mais eficientes no mundo. Outras relações não menos importantes são aquelas estabelecidas pelos fungos, endomicorrizas e ectomicorrizas, que conseguem aprimorar a absorção dos nutrientes e água a partir da colonização das raízes das plantas, e ainda a solubilização dos pós de rochas como demonstrado nos experimentos citados.

Através de consulta à literatura foi possível sustentar a hipótese de que os microrganismos solubilizadores são potenciais alternativas para a mobilização e disponibilização de fosfatos absorvíveis por vegetais, a partir de fontes orgânicas e/ou inorgânicas, incluindo formas de fosfatos de baixo custo (pó-de-rocha) aplicados ao solo. Portanto, trata-se de assunto complexo e que demanda de muita pesquisa. Para sua maior compreensão faz-se necessário amplo conhecimento da dinâmica do solo, pH, da matéria orgânica, da fisiologia vegetal, dos macro e microrganismos, entre outros. A microbiologia, conjuntamente com a biotecnologia, encontra muito respaldo nas mais



variadas instituições de pesquisa e acredita-se que brevemente será tratado com mais ênfase pelas Ciências Agrícolas e Agrárias no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, J. C. *Adubos & Adubações*. São Paulo: Nobel, 200 p. 2002.

AMABIS, J. M; MARTHO G. R. Genética – Evolução Biologia – Ecologia, v.3. Cap. 14 Energia e matéria nos ecossistemas, 2ª Ed. São Paulo: 2004, 438 p.

ASSAD, M. L. L. *Solubilização de Pós-de-Rocha por Aspergillus*. Espaço & Geografia, 9, Nº 1, 2006. Acesso em Junho de 2012.

<http://www.lsie.unb.br/espacoegeografia/index.php/espacoegeografia/article/view/45>

BAROTTI, G. *População microbiana total e solubilizadora de fosfato em solo submetido a diferentes sistemas de cultivo*. Pesq. Agropec. Brasileira, Brasília: v. 35, 10, p. 2043-2050, Acesso junho de 2012. <http://www.scielo.br/pdf/pab/v35n10/35n10a16.pdf>

BERTOL, Ildgardis et. al., *Erosão hídrica em campo nativo sob diversos manejos*: perdas de água e solo e de fósforo, potássio e amônio na água de enxurrada, Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35: 1421 - 1430, 2011.

BERWANGER, A. L; CERETTA, C.A & SANTOS, D. R. *Alterações no teor de fósforo no solo com aplicação de dejetos líquidos de suínos*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32: 2525-2532, 2008.

BISSANI, C. A. *Fertilidade dos Solos e Manejo da Adubação de Culturas* – Departamento de Solos UFRGS, Porto Alegre: 2004.

FIGUEREDO, M. V. B. *Microorganismos e Agrobiodiversidade*: o novo desafio para a agricultura. Agrolivros, 2008, 568 p. (FRANÇA J. G E. de; ANDREOTE, F. D, Cap. 10 Diversidade molecular de microrganismos endofíticos p. 233 - 257; ARAÚJO, J.M, Cap. 12 Importância da actinobactérias para a agricultura p. 277 - 296; Cap. 13 Avanços na aplicação de ectomicorrizas p.297 - 331).

GLIESSMAN, S. R. *Agroecologia*: processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000, 653p.

IPÊ, Centro Ecológico. *Agricultura Ecológica* Alguns princípios básicos, 2002, 51p.

Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. 6ª Edição, 2011.

LAPIDO-LOUREIRO, Francisco E.; MONTE, Marisa Bezerra de Mello; NASCIMENTO, Marisa. Capítulo 7 – Fosfato. In: Luz & Lins (Eds). *Rochas e minerais industriais*. 2ª edição. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro, 2008.

KHATOUNIAN, C. A. *A reconstrução ecológica da agricultura*. C. A. Botucatu ed. Muccio & Associado, 2002 , 345 p.

KHIEL, J. E, *Fertilizantes orgânicos*, Editora Agronômica Ceres Ltda. São Paulo: 1985, 492 p.

KRAUS, E., Rio de Janeiro: 2007, 830 p.

KULAIIF, Y. *Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal*. (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - Relatório Técnico 53, Perfil do Fosfato. 2009. Acesso em março de 2013. [www.mme.gov.br/sgm/galerias/.../P29\\_RT53\\_Perfil do Fosfato.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/.../P29_RT53_Perfil_do_Fosfato.pdf)

MALAVOLTA, E; PIMENTEL-GOMES, F; ALCARDE, J. C, *Adubos & Adubações*. São Paulo: Nobel, 2002, 200 p.

MEURER, E.J; ANGHINONI, I. *Fundamentos da Química do Solo*. Ed. Evangraf LTDA, 4ª Ed. 2010, Porto Alegre: 266 p.

MOREIRA, F.M.S; SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e Bioquímica do solo*. 2ª edição, Ed. UFLA, 2006, 729 p.

NAHAS, Ely. *Resposta à inoculação de fungo solubilizador de fósforo em milho*. Sci. Agric., Piracicaba, 1994, p. 463-469.

NAHAS, Ely. *Microrganismos do solo produtores de fosfatases em diferentes sistemas agrícolas*. Bragantia, Campinas, 2002, v. 61, n. 3 p. 267 – 275.

NOVAIS, R. F. et al., *Fertilidade do solo*. Cap VII – Fósforo, Viçosa 2007, 1017 p.

PINHEIRO MACHADO, L. C. *Pastoreio Racional Voisin: Tecnologia Agroecológica para o 3º Milênio* - Porto Alegre: Cinco Continentes, 2004, 310 p.

PINHEIRO, S.; BARRETO S. B “*MB-4*”: *Agricultura sustentável, trofobiose e biofertilizantes*. Fundação Juquira Candiru Mibassa, 2005, 275 p.

RAVEN, P. H; RAY F. E.; SUSAN E. E. *Biologia Vegetal*. Traduzido Jane Elizabeth Kraus: revisão técnica Jane Elizabeth Kraus, Neuza Maria de Castro; tradução Ana Cláudia de Macêdo Vieira... et al, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007, 830 p.

SOUCHIE, E. L. Solubilização de fosfatos em meio sólido e líquido por bactérias e fungos.

SOUZA, A. E. *Balanço Mineral Brasileiro*. Brasília, 2001, 31 p.

Aceso jan. 2013 [www.dnpm.gov.br/assets/.../balancomineral2001/fosfato.pdf](http://www.dnpm.gov.br/assets/.../balancomineral2001/fosfato.pdf)

SILVA FILHO, G. N. *Solubilização de fosfatos por microorganismos na presença de fontes de carbono*. Revista Bras. Ciência do Solo. N 24: 311-319.2000. Acesso em junho de 2012. <http://sbc.solos.ufv.br/solos/revistas/v24n2a08.pdf>