



Fósforo

Marilia Camotti Bastos
Engenheira Agrônoma
Mestranda em Ciências do solo
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola-UFPR
marilia@ufpr.br

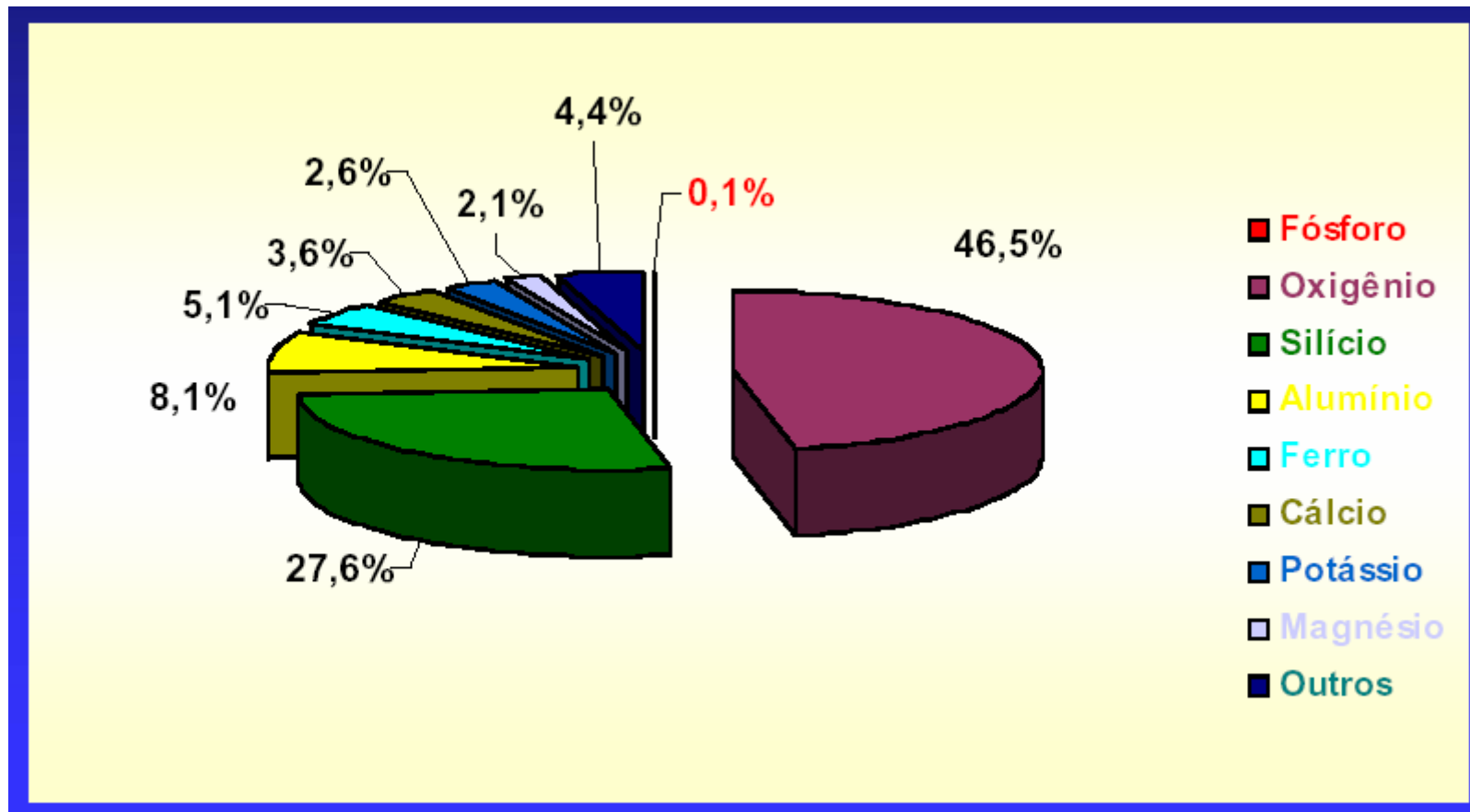


Introdução

- Grego : phosphorus (portador de luz)
- Símbolo: P
- Número atômico 15 (15 prótons e 15 elétrons)
- Massa atômica igual a 31 u.m.a.
- Elemento essencial

Introdução

COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DA CROSTA TERRESTRE NA PROFUNDIDADE DE 0 – 16 KM (MENGEL & KIRKBY, 1987)



Introdução

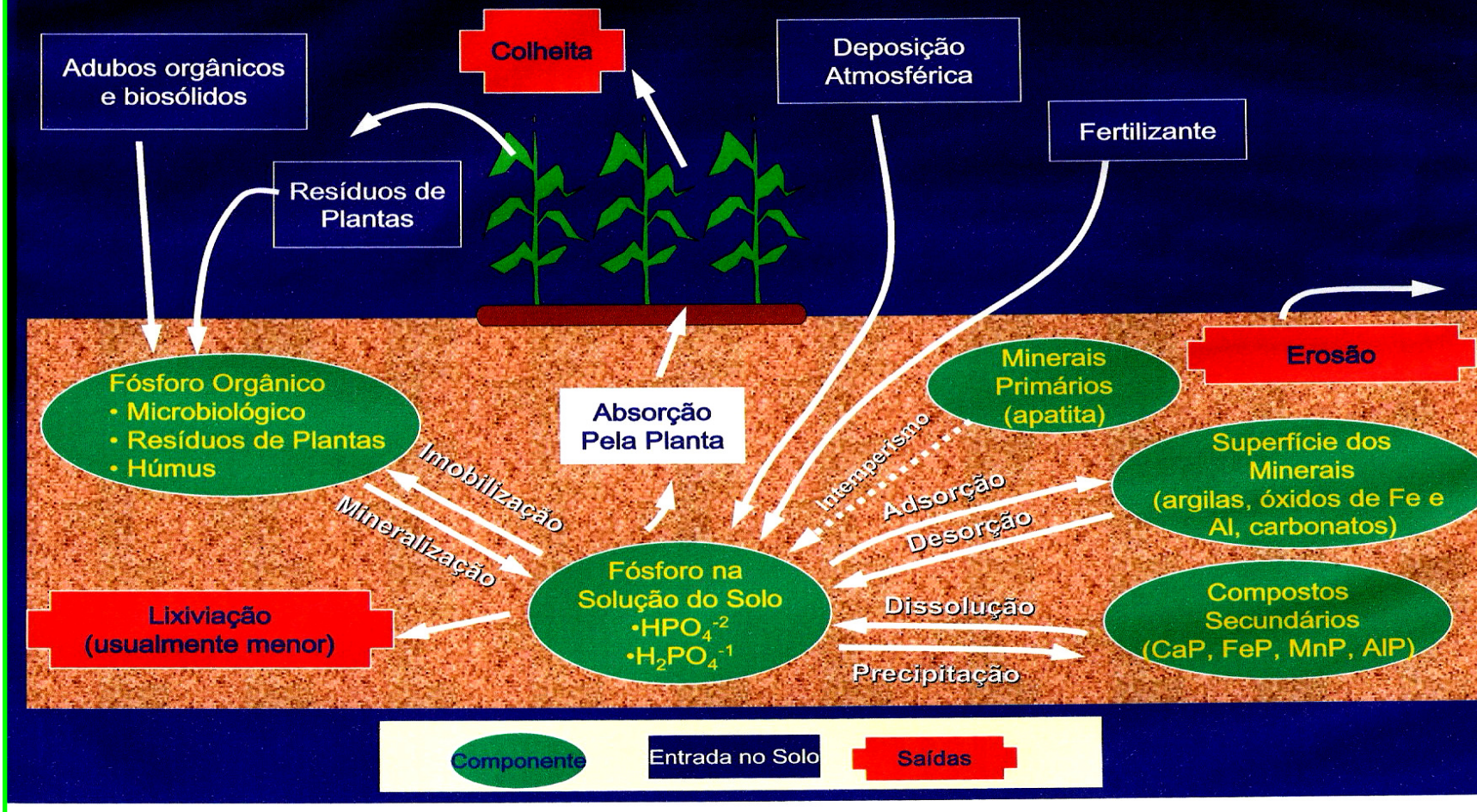
Material de origem
Interação com o solo



FREQÜÊNCIA RELATIVA DAS DEFICIÊNCIAS DE FÓSFORO NO BRASIL

Ciclo do P

Ciclo do Fósforo

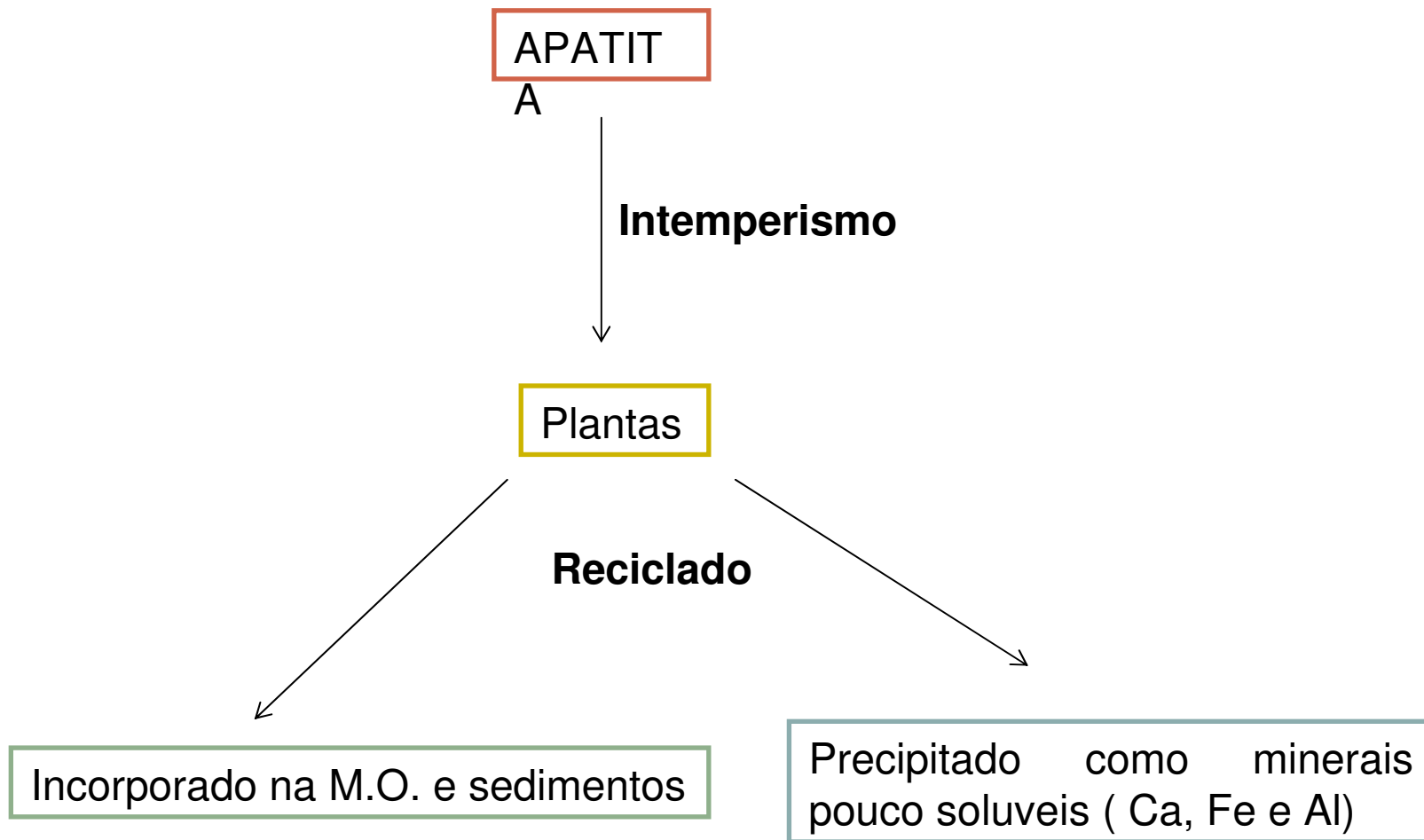


Fósforo no solo

Reservas

- Sedimentos Marinhos
- Solos
- Fósforo inorgânico (dissolvidos nos oceanos)
- Minerais (apatita)

Geologia do P



P solo

(1) P forma iônica e em compostos na solução do solo

(2) Minerais cristalinos e amorfos de P

(3) P adsorvido da superfície dos constituintes minerais

(4) P componente da M.O.

Formas de P no solo

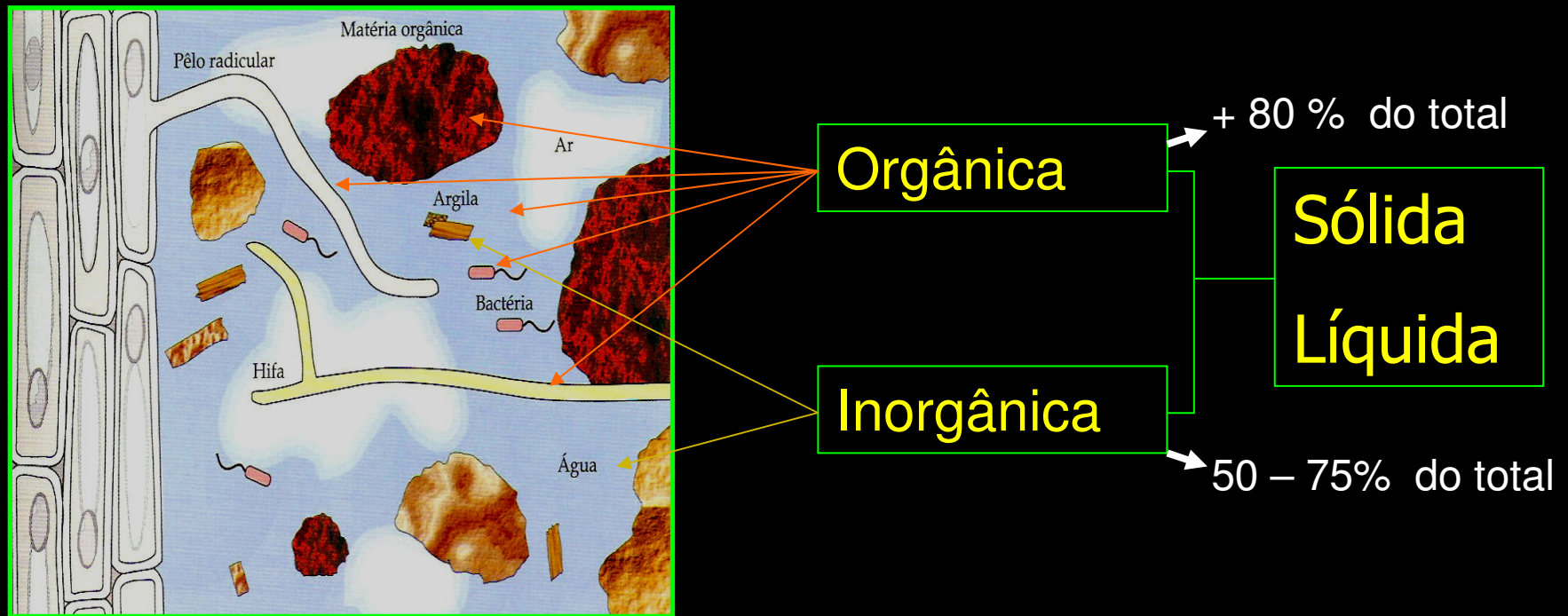


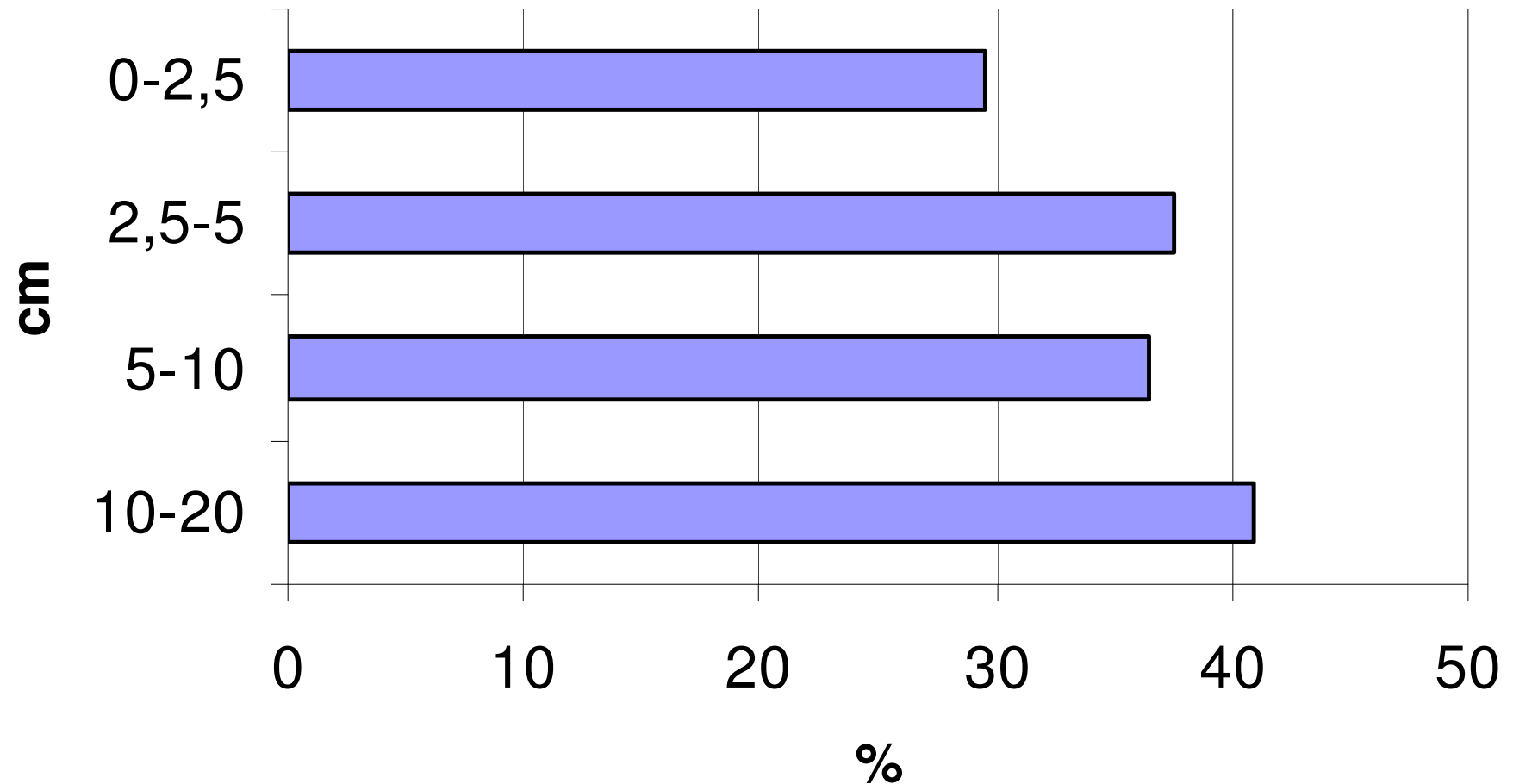
Figura 5: Representação da rizosfera, pêlo radicular e porção sólida e líquida e matéria orgânica do solo.

Fonte: Epstein & Bloom (2006).

Fósforo Orgânico

- Varia de 4% em solos pobres em MO a 90% em solos orgânicos
 - Esta porcentagem depende:
 - Material de origem
 - Evolução pedogenética do solo
 - Conteúdo de C e efeito do clima no desdobramento dos compostos orgânicos

Fósforo Orgânico



PLANTIO DIRETO

Participação do P orgânico no P total

Fósforo inorgânico

FORMAS INORGÂNICAS DE FÓSFORO EM SOLOS BRASILEIROS

Local, referência e solo	Formas de P no solo (mg kg ⁻¹)		
	P-Al	P-Fe	P-Ca
Bahia (CABALAROSAND; FASBENDER, 1971)			
Cepec	103	863	241
Itabuna	3	36	19
Hidromórfico	41	67	24
Rio Branco	25	257	38
Itamirim	5	37	14
Valença	3	5	8
Goiás (BAHIA FILHO; BRAGA, 1975)			
LE	34	44	36
LE	332	313	112
LRe	76	64	63
LV	60	105	180

**EXTENSÃO GEOGRÁFICA E AS PRINCIPAIS LIMITAÇÕES PARA AS
REGIÕES DE SOLOS ÁCIDOS, INFÉRTEIS NA AMÉRICA TROPICAL
(SANCHEZ & SALINAS, 1981)**

Limitações	Milhões hectares	% da Área Total
Físicas		
Falta de Chuva (> 3 meses)	299	29
Químicas		
<u>Deficiência de P</u>	1002	96
Baixa CTC Efetiva	577	55
Deficiência de Zn	645	62
Alta Fixação de P	672	74

**SUMÁRIO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS OBSERVADAS EM 518
AMOSTRAS DE SOLOS SUPERFICIAIS SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO NO
BRASIL (INCLUINDO 16 AMOSTRAS SOB VEGETAÇÃO DE FLORESTAS)
(LOPES, 1975 E GALRÃO & LOPES, 1979)**

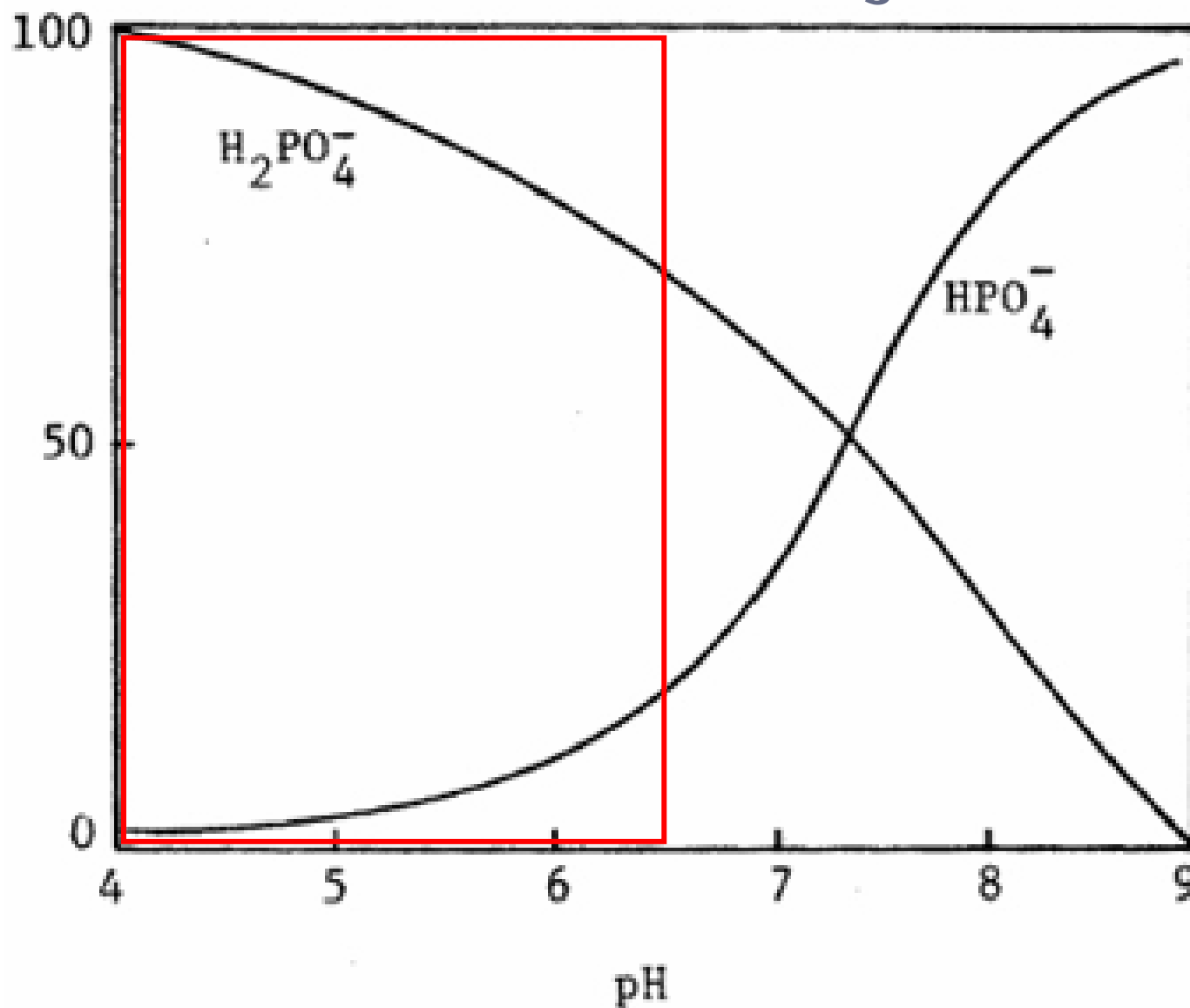
Característica Química	Nível Crítico	Amostras Abaixo do Nível Crítico (%) ^(A)	Mediana	Amplitude Mais Comum Nível	Total (%)
pH (H ₂ O)	5,0	48	5	4,8	48
Ca Troc. (meq./100 cc)	1,5	96	0,25	< 0,4	76
Mg Troc. (meq./100 cc)	0,5	90	0,09	< 0,2	74
Al Troc. (meq./100 cc)	0,25	91(B)	0,56	0,25	64
P Sol. (ppm) [©]	10	99	0,4	0,2	79
Zn Sol. (ppm) ^(C)	1,0	95	0,6	0,5	69

(A) De acordo com os laboratórios de análise de solos para Minas Gerais.

(B) % Acima do nível crítico.

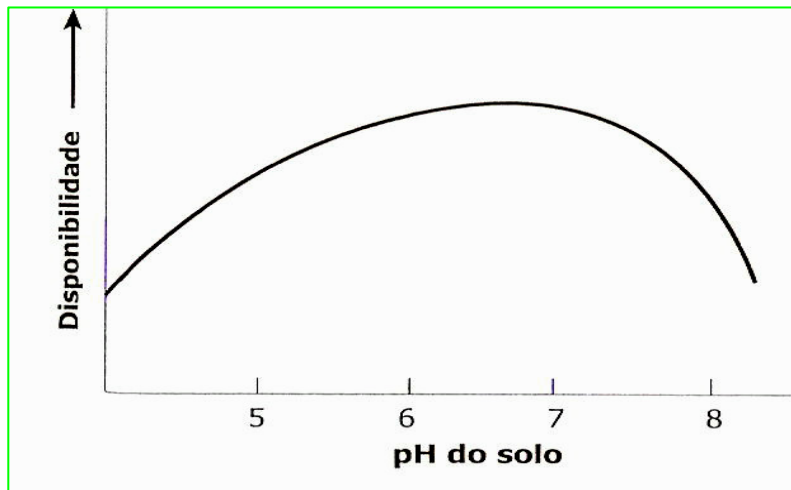
(C) Extraído por HCl 0.05N + H₂SO₄ 0,025N.

Forma iônica na solução do solo



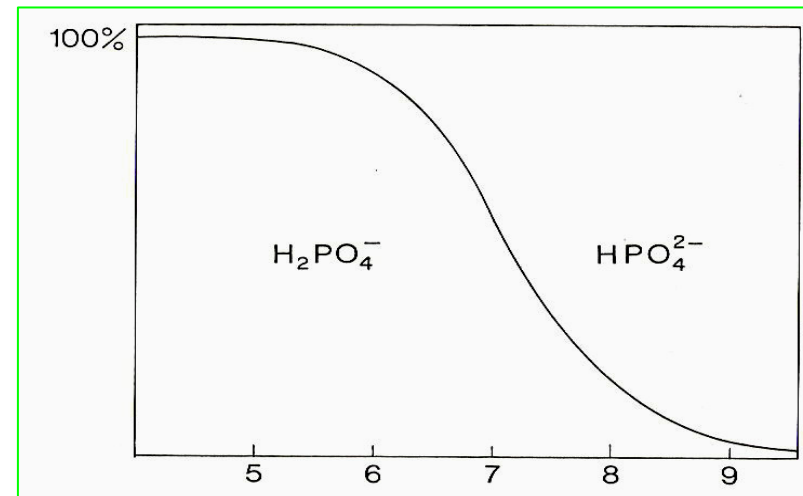
Distribuição relativa dos íons ortofosfato em relação ao pH da solução

FORMAS DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DO pH



Efeito do pH do solo na disponibilidade de P para as plantas.

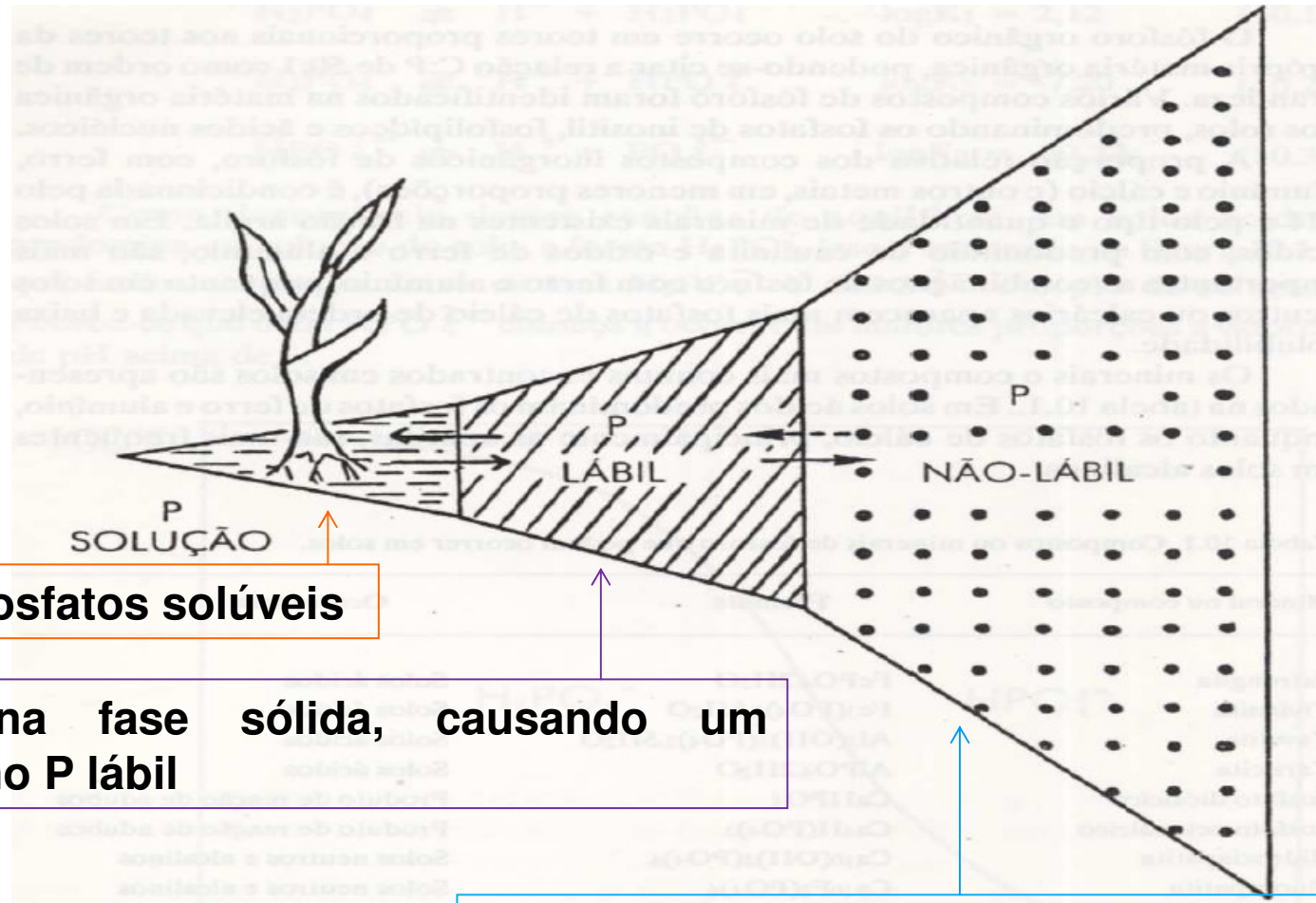
Fonte: Bissani *et al.* (2004)



Taxa de H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} em função do pH.

Fonte: Mengel & Kirkby, (1982)

Fósforo no solo x absorção



Fosfatos solúveis

Fósforo na fase sólida, causando um aumento no P lábil

Envelhecimento dos fosfatos lábeis. Constituintes mineralógicos mais estáveis e de solubilização mais difícil (P-não lábil)

Fósforo na planta

Absorção, Transporte e
Redistribuição

Disponibilidade de P para as plantas

- ~de 90% dos solos brasileiros são pobres em P
- O teor de P na solução: normalmente menor de $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$
- O P no solo é pouco móvel (1 a 2 mm de distância)
- Mais de 90% do P chega até a raiz por **DIFUSÃO** (zona de depleção – gradiente de potencial químico)

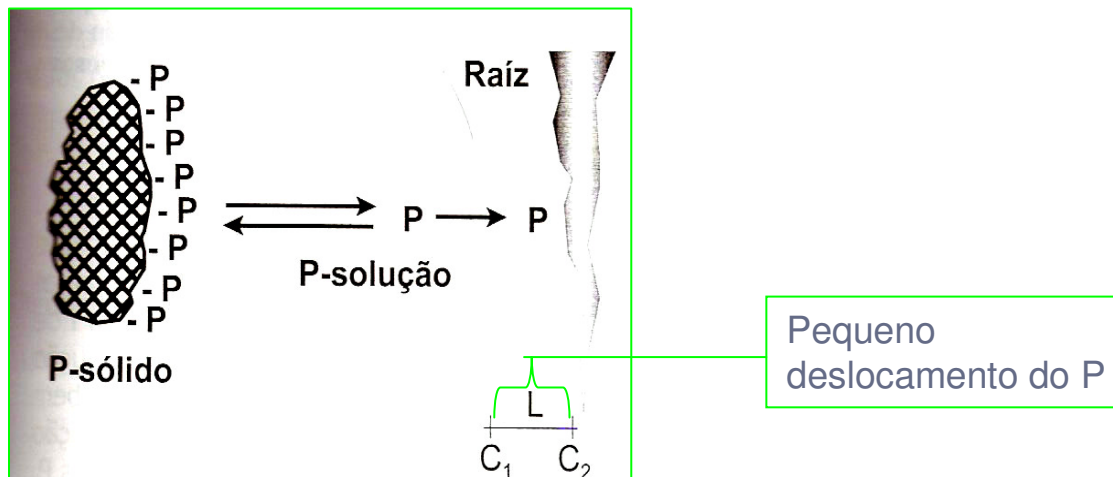
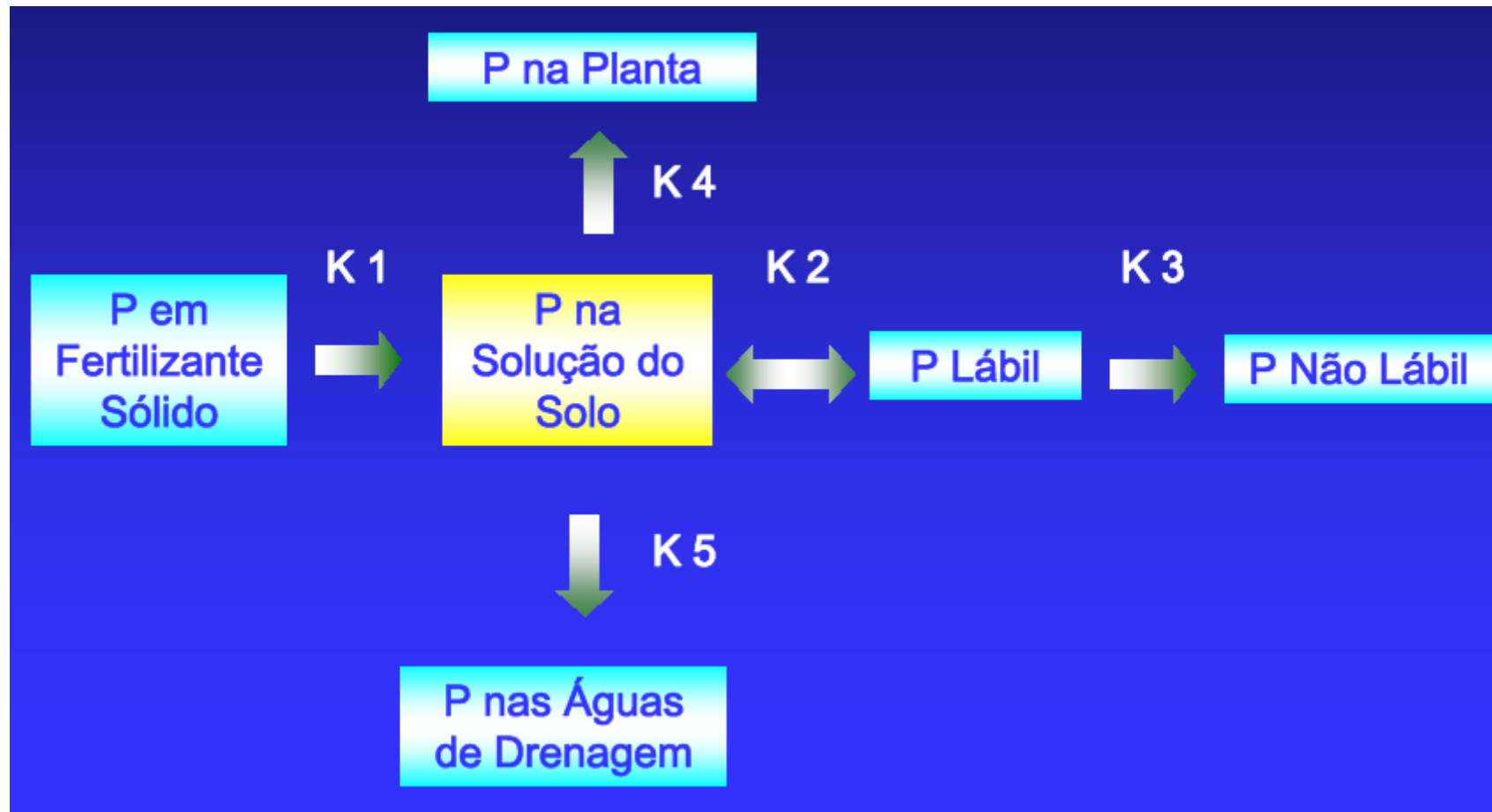


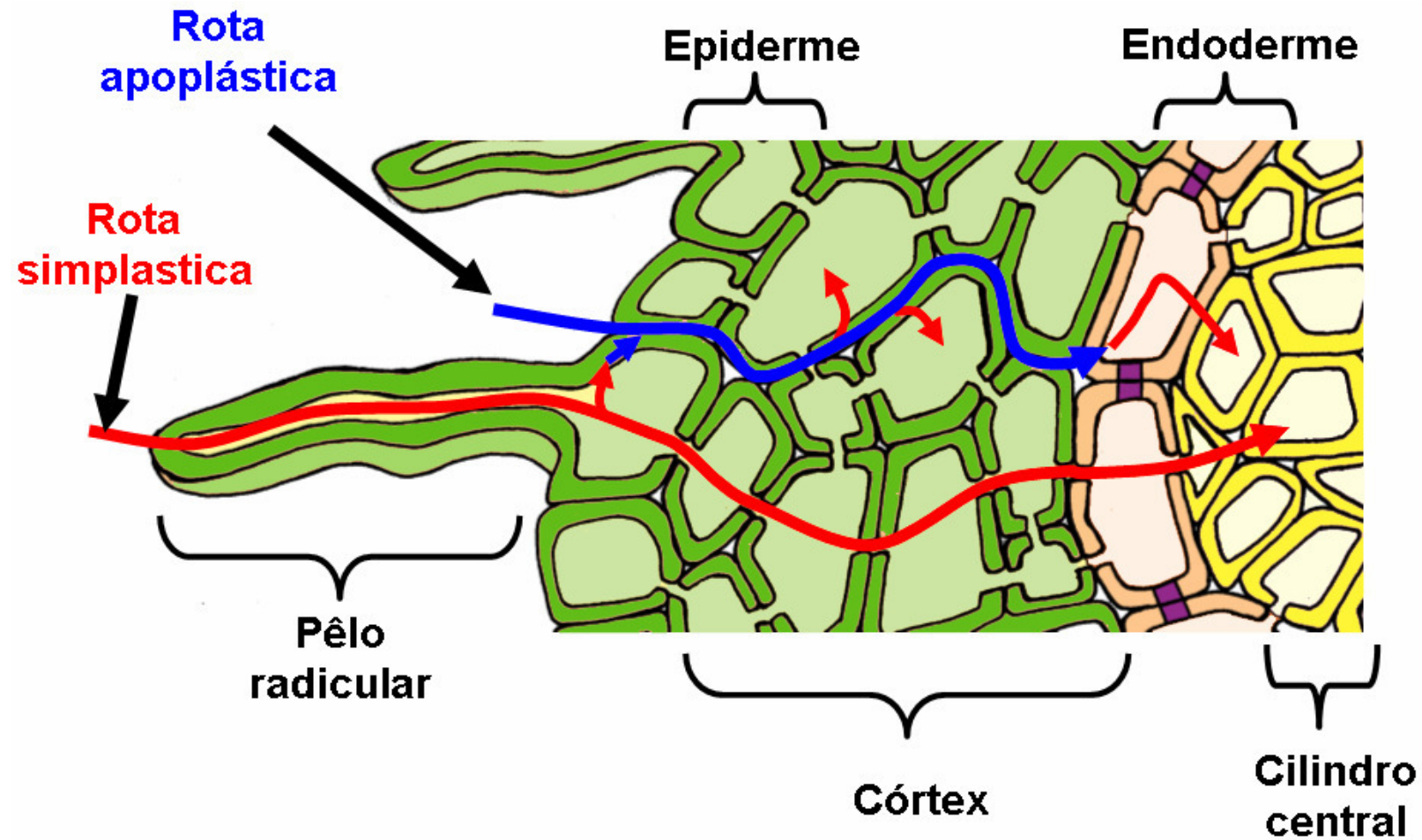
Figura 8: Deslocamento do P na solução do solo

Fonte: Bissani *et al.* (2004)

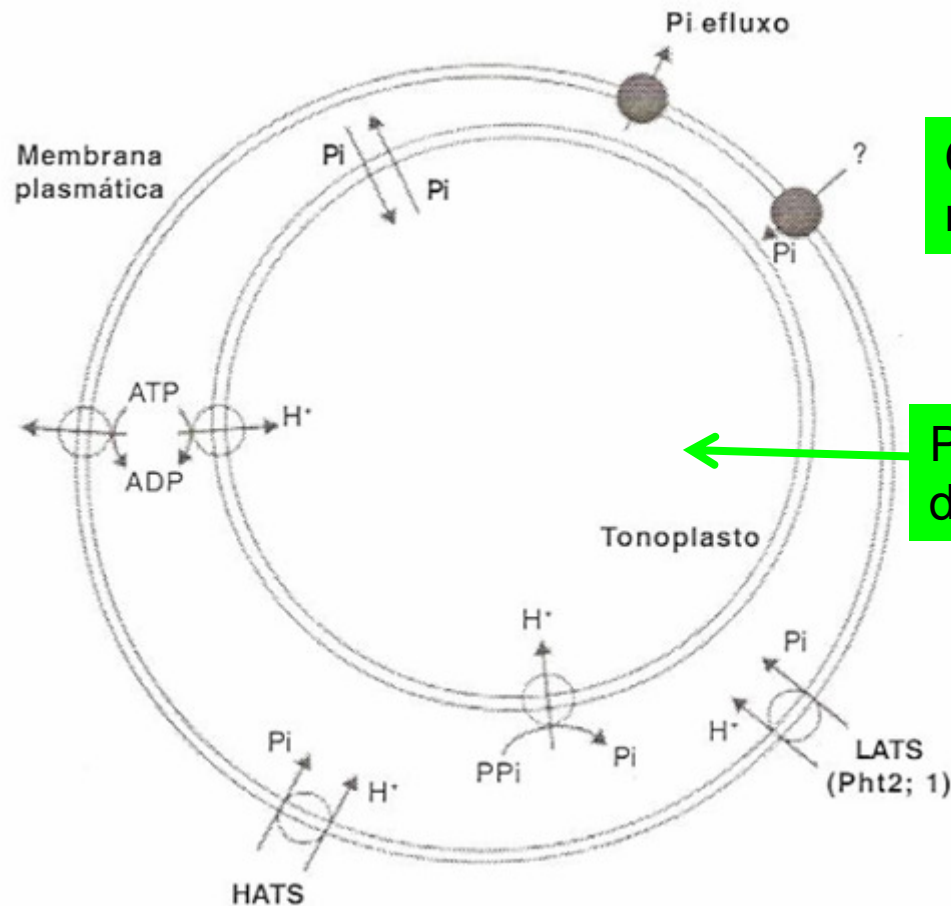
**COMPORTAMENTO DO FÓSFORO EM SOLO ADUBADO, COM RELAÇÃO
AOS ASPECTOS QUE AFETAM A NUTRIÇÃO VEGETAL (ADAPTADO DE
LARSEN, 1971)**



P- Rota simplástica



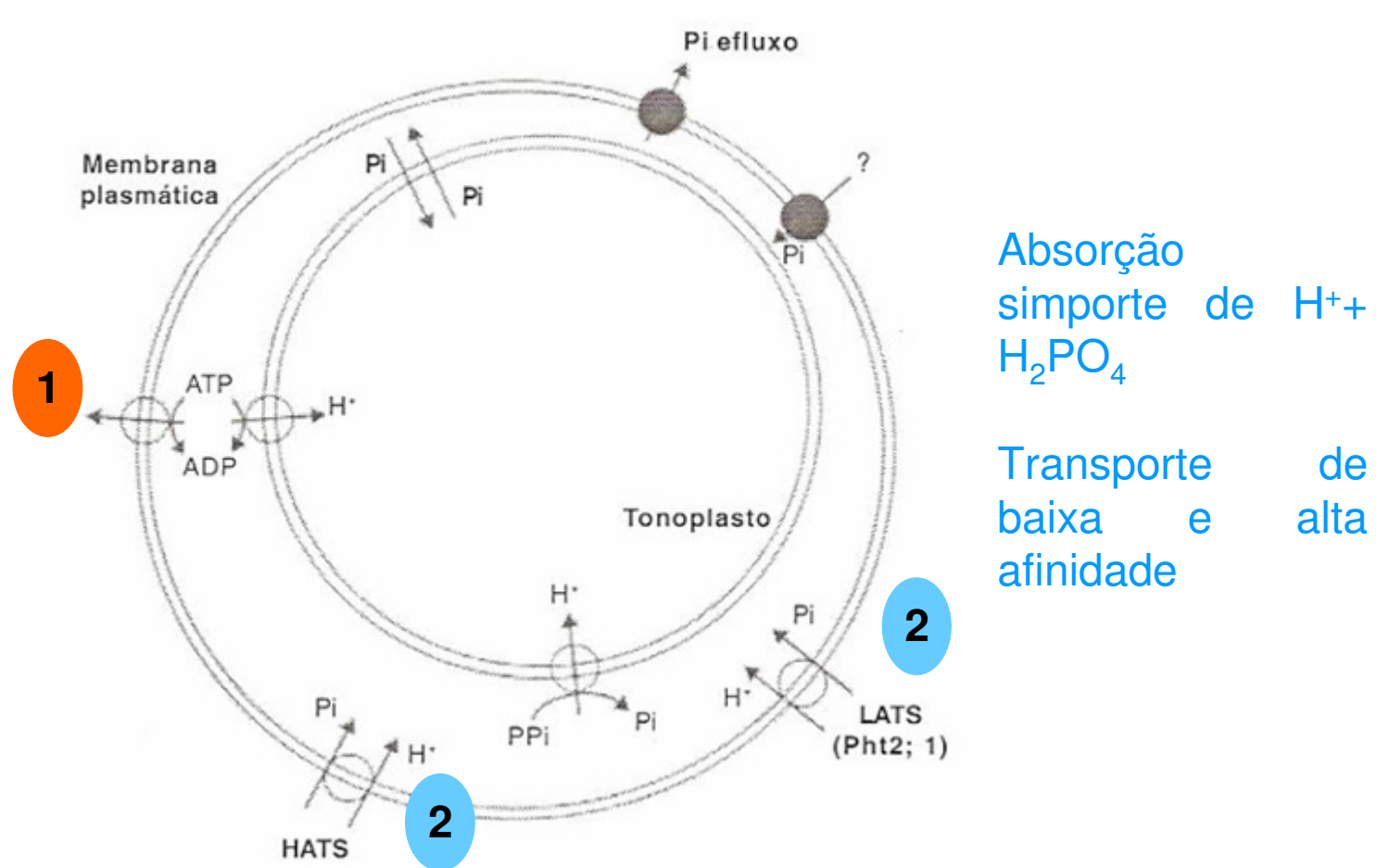
Absorção de fósforo



Célula: Pi 100 vezes maior que o solo

P entra contra gradiente de concentração

Absorção de fósforo



Energia da bomba de extrusão de prótons –
H⁺ fora da célula gera diferença de potencial
elétrico (interno: negativo / externo: ácido)

Transporte e Redistribuição de P

- O P é redistribuído através do floema
- Em plantas bem supridas de P
 - Vacúolo armazena cerca de 85 a 95% do P_i total da planta
- Suprimento externo limitado de P, o fosfato das células mais velhas é deslocado para as mais jovens

Associações com microorganismos

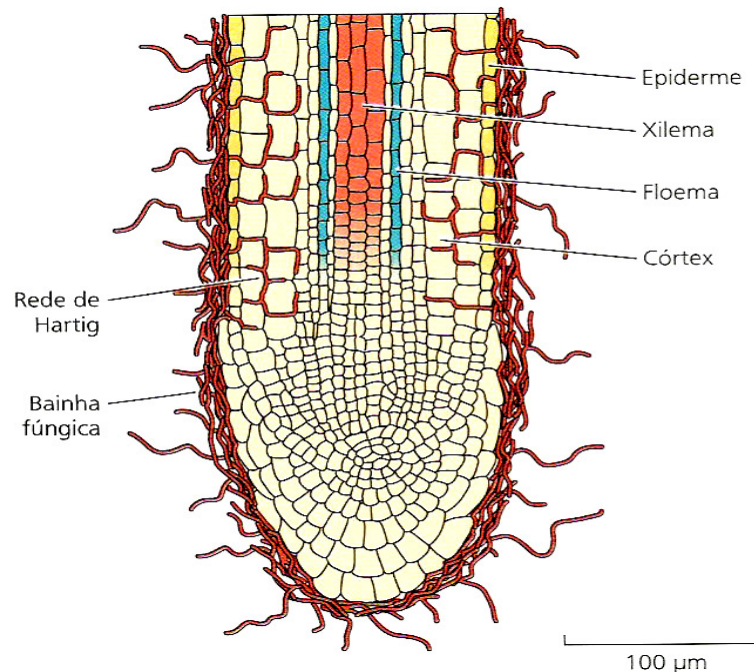
Fungos micorrízicos facilitam a entrada de P

Associação simbiótica não patogênica entre fungos e raízes de plantas superiores

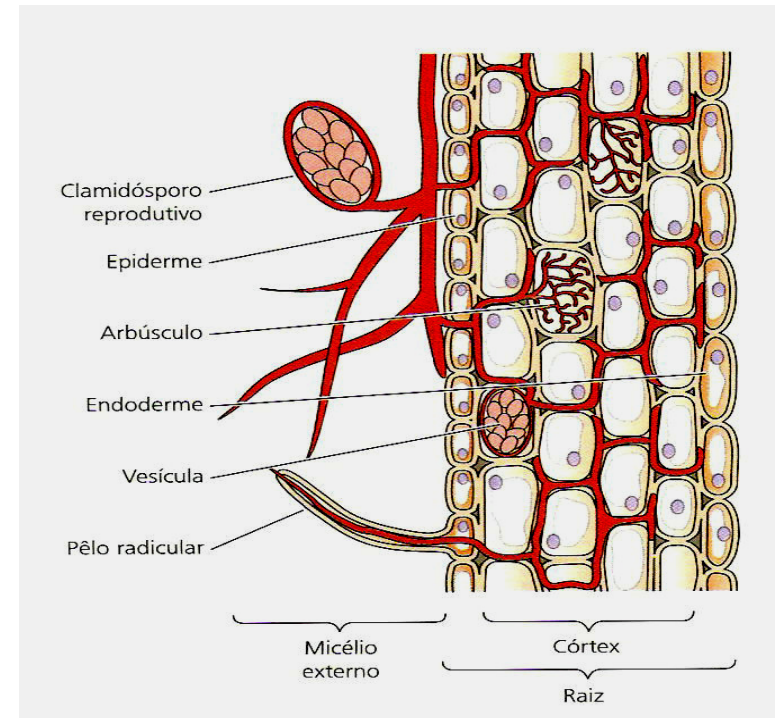
(Miranda & Miranda, 1997)

- **Aumenta até 80% a absorção de P:**
 - Aumento da superfície e exploração do solo;
 - Aumento da capacidade de absorção da raiz;
 - Aumento da dissolução de fosfatos;
 - Armazenamento temporário de nutrientes na biomassa fúngica e nas raízes.

Infestação micorrízica em raízes

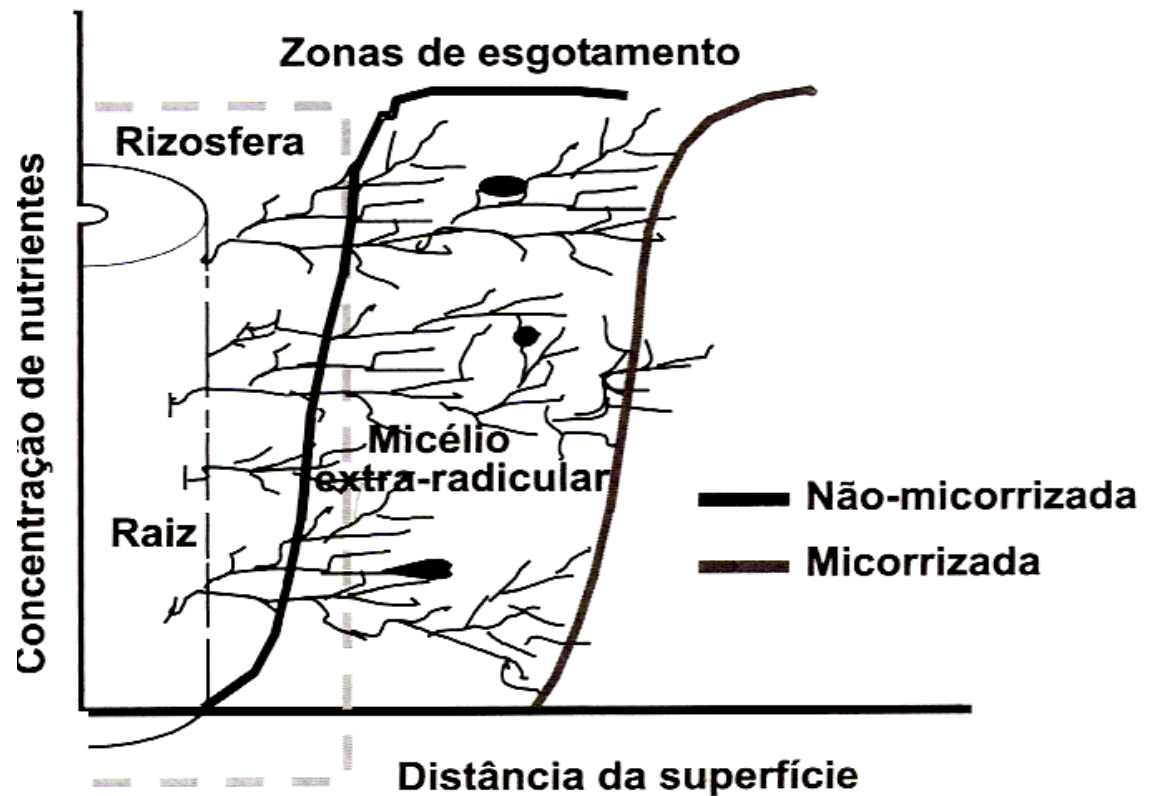


Hifas fúngicas circundam a raiz para produzir uma densa bainha fúngica e penetra nos espaços intercelulares do córtex. (Adaptado de Taiz & Zeiger, 2004).



Hifas do fungo crescem nos espaços intercelulares das paredes do córtex e penetram nas células corticais individuais. (Adaptado de Taiz & Zeiger, 2004).

Esgotamento e Absorção de P



Segmento de raiz micorrizada mostrando zonas de esgotamento de P e aumento da exploração do solo pelo micélio externo. (Adaptado de Siqueira *et al.*, 2004).

Funções do P

Funções do P

- **Como elemento estrutural**
- **Armazenamento e transferência de energia**
- **Função regulatória do fosfato inorgânico**
- **Fósforo como reserva**

Funções do P

- **Como elemento estrutural**

- Constituinte da estrutura molecular como ácido nucléicos (DNA e RNA) $\Rightarrow$ importantes no armazenamento e transferência da informação genética.
- Fosfato forma uma ponte entre as unidades de ribonucleosídeos para formar as macromoléculas.
- O fósforo forma ligação diéster abundante nos fosfolipídios das biomembranas, formando ponte entre um diglicerídeo e outras moléculas

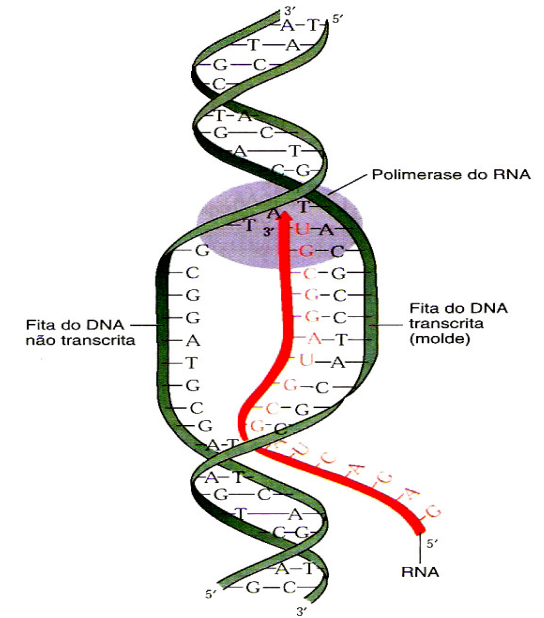
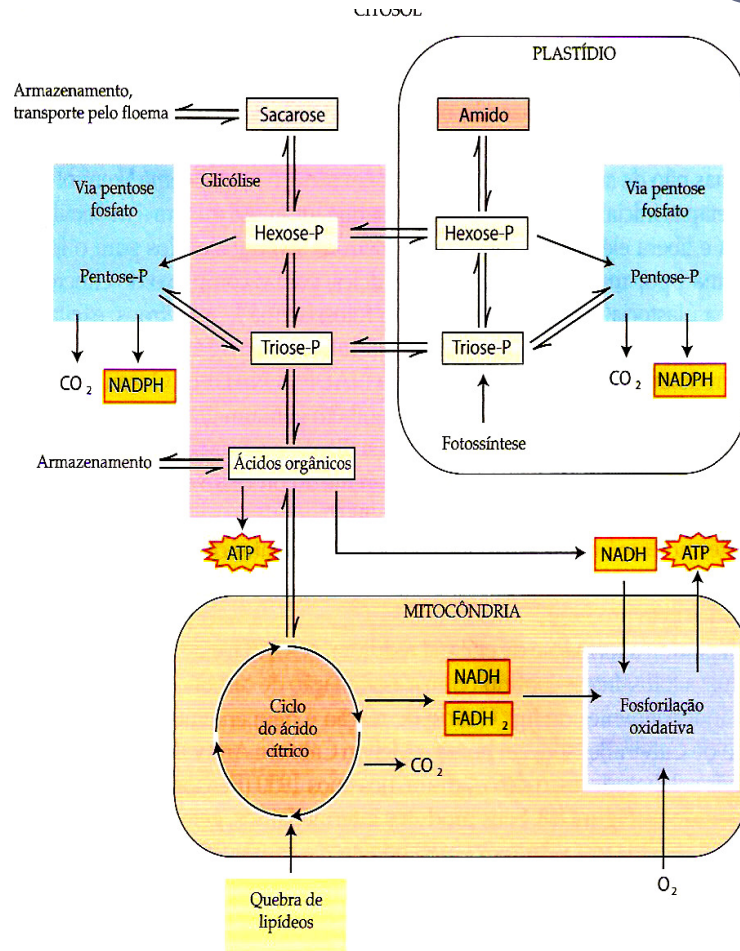


Figura 16:
Representação da fita de
DNA e RNA.

Fonte: Raven et al.
(1992).

Funções do P



Visão geral da respiração.

Fonte: Epstein & Bloom (2006).

- **Armazenamento e transferência de energia (Respiração):**

- **Glicólise:** conversão de açúcares a ácidos orgânicos gerando NADH ou NADPH e ATP.
- **Rota dos pentoses:** o carbono é oxidado e gera NADPH.
- **Ciclo do ácido cítrico:** o piruvato é oxidado a CO_2 gerando NADH e FADH_2 .
- **Fosforilação oxidativa:** os elétrons são transferidos ao longo de uma cadeia de transporte de elétrons, ligadas a membrana da mitocôndria

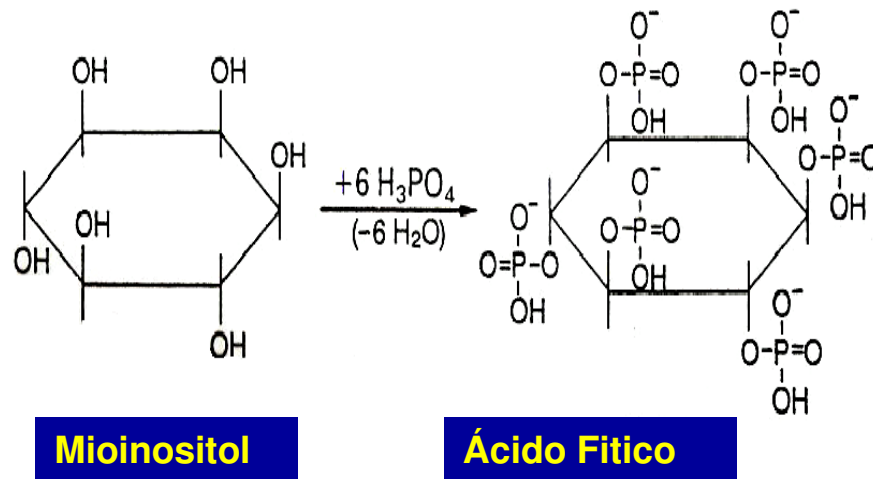
Funções do P

- **Função regulatória do fosfato inorgânico**
 - O P_i , pode ser um substrato ou um produto final
 - P_i controla algumas reações chaves de algumas enzimas, principalmente no citoplasma e cloroplastos.

Funções do P

- **Fósforo como reserva**

- As sementes e frutos podem armazenar o fósforo na forma de fitato. Os fitatos são sais do ácido fítico (mioinositol do ácido hexafosfórico).
- O ácido fítico tem também, alta afinidade por Zn e Fe.



Estrutura do ácido fítico.

Fonte: Mengel & Kirkby, (1982).

- Os fitatos contendo fósforo representam cerca de 50% do P total em leguminosas e 60-70% em grãos de cereais.

Teores, Extração e Exportação

Teores totais de P considerados ideais para algumas culturas

Culturas	g kg⁻¹ de P		Culturas	g kg⁻¹ de P
Algodoeiro	2,0-2,5		Soja	2,6-5,0
Amendoim	2,0		Tomateiro	3,5
Arroz	2,5-4,0		Trigo	2,0-3,0
Batata	3,5		Alfafa	2,5-5,0
Cacaueiro	1,5-1,8		Guandu	1,5-3,0
Cafeeiro	1,6-1,9		Leucena	1,5-3,0
Cana-de-açúcar	1,8-2,4		Soja perene	1,5-3,0
Fumo	2,0-3,0		Araucária	1,4-1,8
Feijoeiro	2,0-3,0		Eucalipto	1,0-1,3
Laranjeira	1,2-1,6		Pinus	1,0-1,2
Mandioca	3,0-5,0		Erva-mate	1,4
Milho	2,5-3,5		Aveia	2,0-5,0

Fonte: Malavolta (1987), Raij *et al.*, (1997).

Teores totais variam de 1,0 – 5,0 g kg⁻¹

Extração de nutrientes por algumas culturas anuais

Elemento	Extração					
	Milho	Soja	Feijão	Trigo	Aveia Preta*	Ervilha ca**
----- kg/t -----						
N	23,7	79,4	102	28	16,5	20,2
P	4,2	7,3	9	3,9	1	1,3
K	20,0	32,1	93	19,9	16	21
Ca	4,1	13,1	54	2,4	2,5	8,6
Mg	4,9	7,1	18	2,3	1,7	2,7
S	2,5	8,3	25	3,5	-	-
----- g t ⁻¹ -----						
B	19,13	77	66,3	19,9	-	-
Fe	237,59	460	431,2	374	-	-
Mn	46,87	130	175,8	106,1	102	87
Cu	13,02	26	19,9	6,2	7	9
Zn	47,17	61	49,8	19,8	11	24
Mo	1,00	6,5	-	-	-	-

*Adaptado de Pauletti, 2004

Exportação de nutrientes em grãos

	N	P	K	S	Cu	Zn	B	Mn
	----- Kg t ⁻¹ -----				----- g t ⁻¹ -----			
Soja	59,2	5,5	18,7	3,2	13	37,7	22	33,7
Milho	15,8	3,8	4,8	1,1	1,2	27,6	3,2	6,1
Trigo	31,9	3,2	4,9	3,1	5,4	36	5,1	26,8



SOLO



ADUBO MINERAL



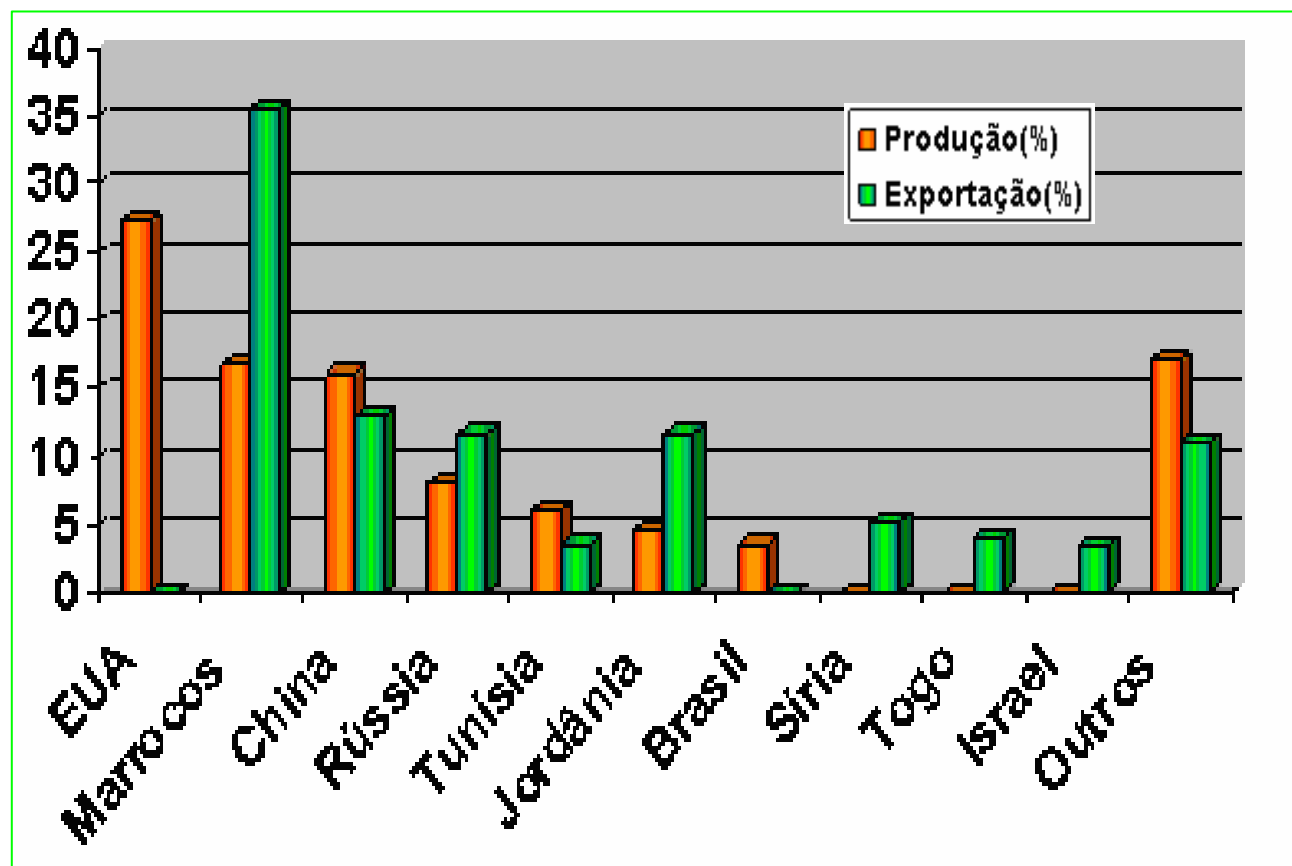
ADUBO ORGÂNICO

Fontes de Adubo

Adubos Minerais



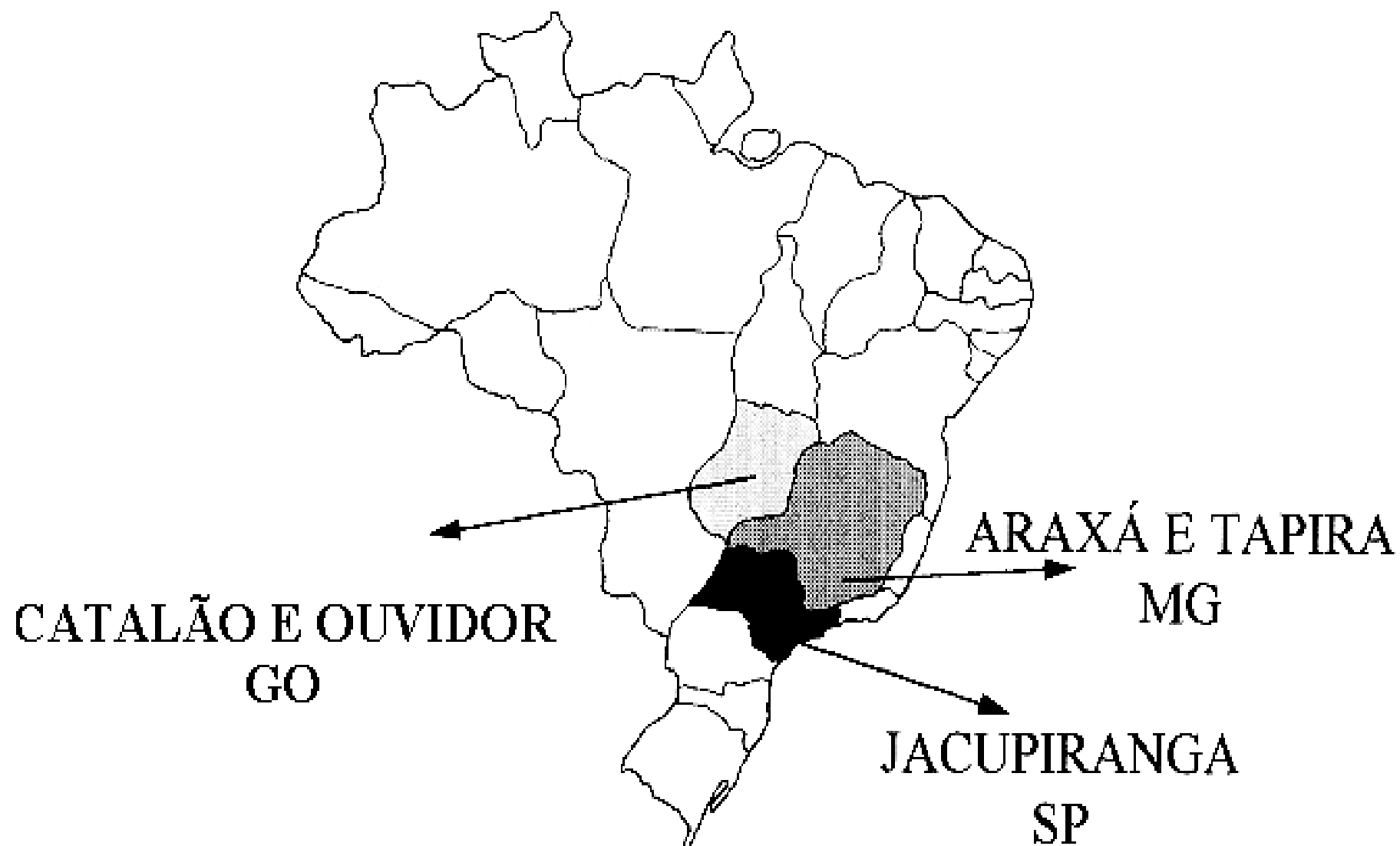
Produção e exportação mundial de rochas fosfáticas



Produção: 131,1 milhões de t.; Exportação: 30,4 milhões de t.

Fonte: Adaptado de Lopes *et al.*, (2004).

MINAS DE ROCHA FOSFÁTICA NO



Reservas brasileiras de rochas fosfáticas

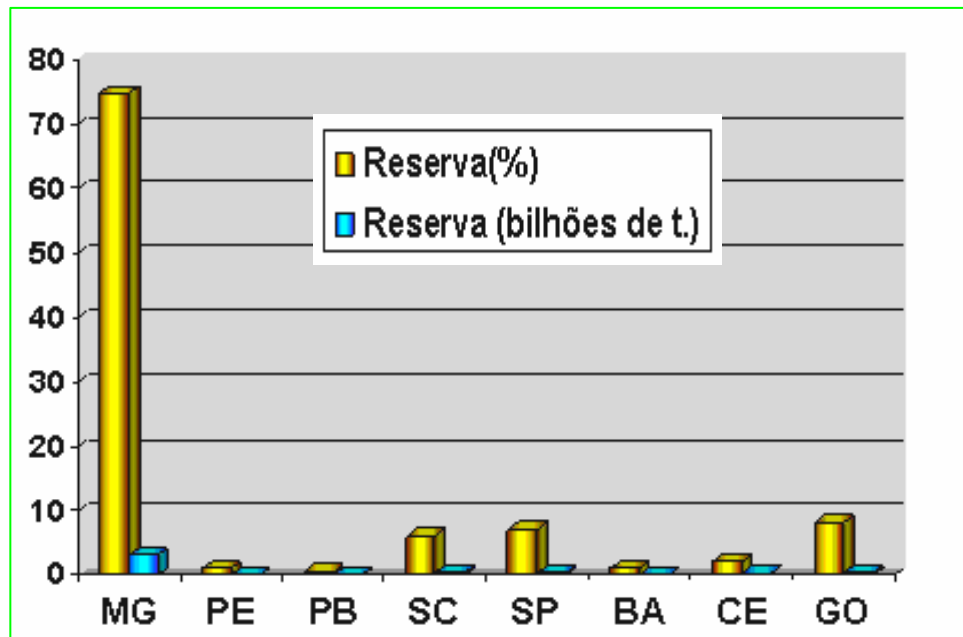
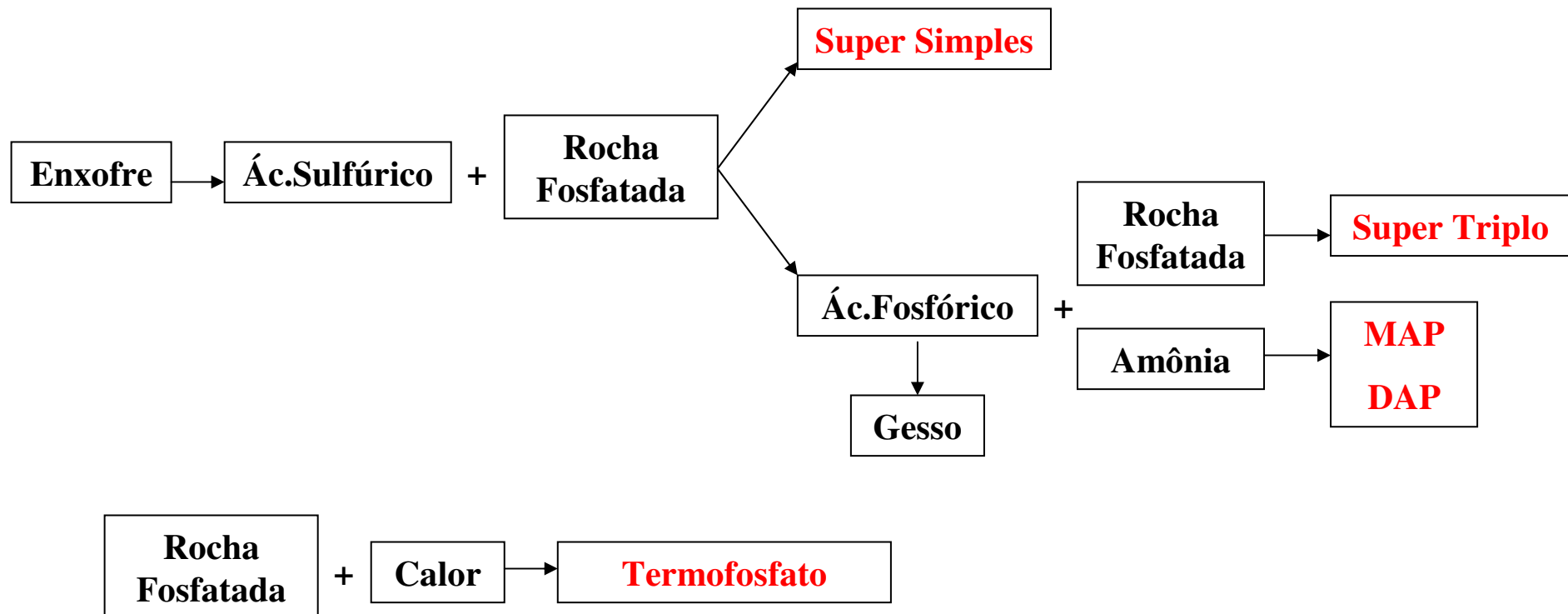


Figura 3. Estados brasileiros com reservas aprovadas de rocha fosfática. Total de 4,04 bilhões de toneladas.

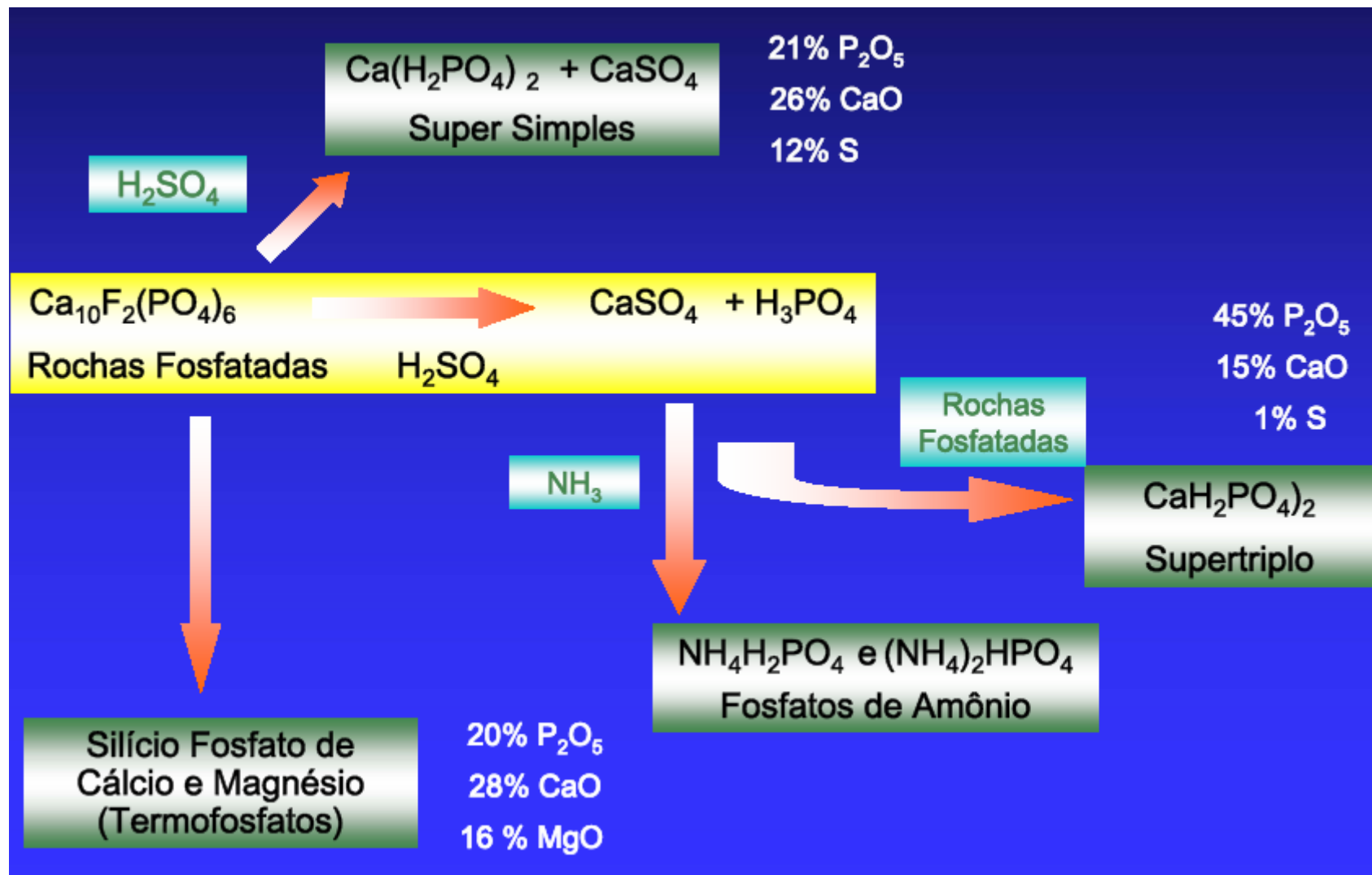
Fonte: Adaptado de Lopes *et al.* (2004).

Reservas brasileiras economicamente exploráveis de rochas fosfáticas 2,77 bilhões de toneladas, com teor médio de 8% de P_2O_5 .

ROTA DE PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS



ESQUEMA DE PRODUÇÃO DOS PRINCIPAIS ADUBOS FOSFATADOS



ADUBOS FOSFATADOS

Adubos Fosfatados	%					
	P ₂ O ₅ Total	P ₂ O ₅ a.c.	N	CaO	MgO	S
Superfosfato Simples	21	18	-	26	-	12
Superfosfato Triplo	45	42	-	15	-	1 - 2
Fosfato Monoamônico	52	52	10	-	-	1
Fosfato Diamônico	45	43	18	-	-	-
Nitrofosfato	20	18	18	12	-	-
Fosfato Bicálcico	40	40	-	30	-	-
Termofosfato	19	16	-	28	16	-
Escória de Thomas	19	15	-	25	-	-
Farinha de Ossos	30	25	-	36	-	-
Olinda	26	5	-	43	-	-
Hiperfosfato	27	12	-	40	-	-

Adubo Orgânico



Estercos

Material orgânico	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Matéria seca
	kg m ⁻³ de churume			%
Esterco líquido de suínos	4,5	4	1,6	6
Esterco líquido de bovinos	1,4	0,8	1,4	4,6



FRANGO CORTE

Amostra	--- Frango corte ---		
	Média		Variação
Umidade %	33,2		20,1 – 47,2
Densidade g/litro	293,9		253 - 324
	kg ton ⁻¹	kg m ⁻³	kg ton ⁻¹
MS	668	196,7	528 – 799
Resíduo mineral	63,7	18,7	37,7 – 106,2
CaO	13,9	4,1	8,8 - 19
N	17,2	5,1	11 – 24,1
P ₂ O ₅	12,6	3,7	8,5 – 23,8
K ₂ O	8,4	2,5	4,3 – 10,8

Adaptado de PAULETTI E DEMOGALSKI, 2002.

+ - 50% liberado na primeira safra

RESPOSTA DAS CULTURAS A ADUBAÇÃO FOSFATADA

Correção do solo

TEOR DE NUTRIENTES NO SOLO

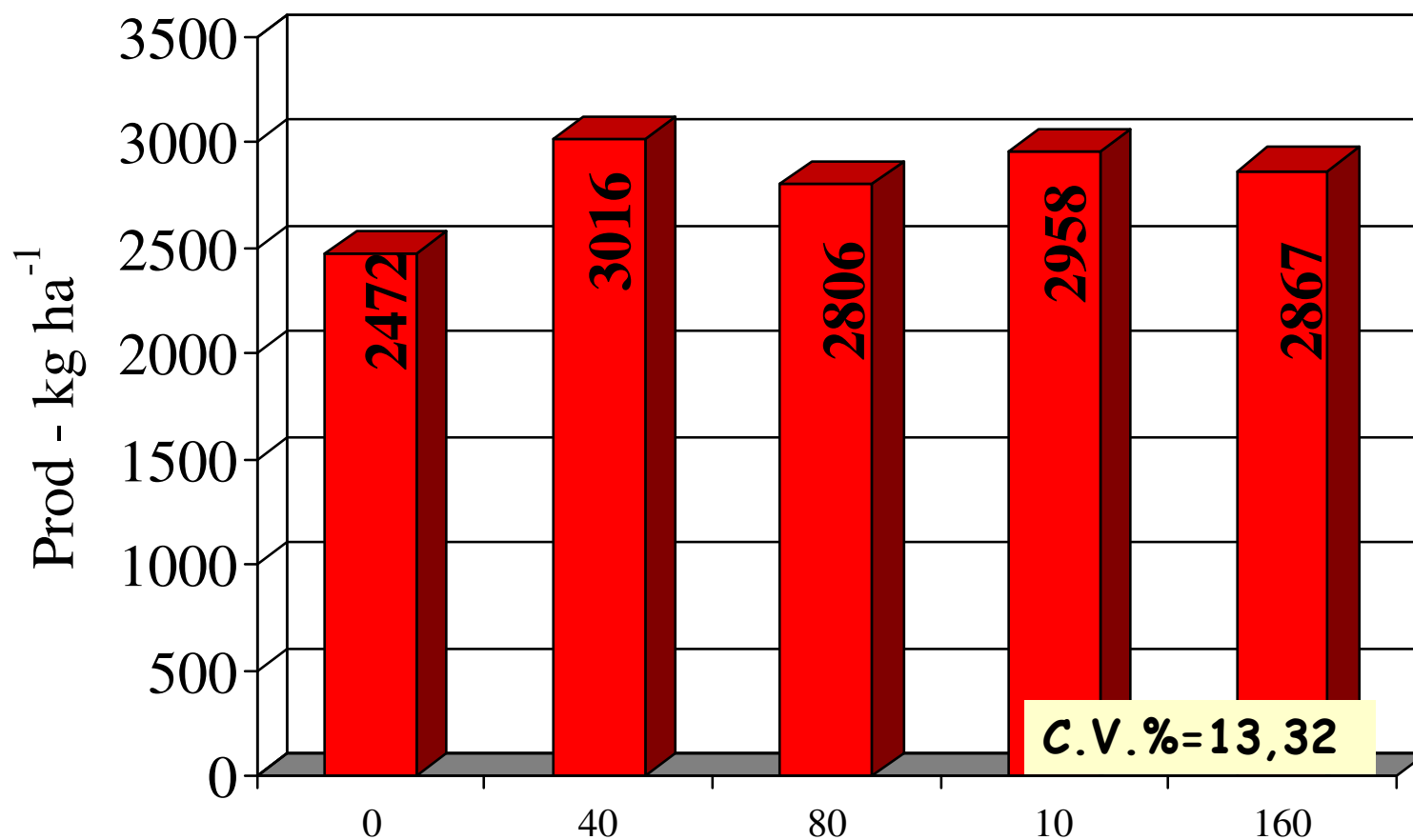
Classe		P resina	K ⁺
Muito Baixo		< 5	≤ 0,7
Baixo	> dose	5,1 - 9	0,8 - 1,5
Médio		9,1 - 18	1,6 - 3,0
Alto	Balanço	> 18	3,1 - 6,0

Rendimento de grãos de soja obtidos em função de diferentes doses de fosfatos em solo de baixa disponibilidade de fósforo. 2^o cultivo.

Fonte	0	50	100	400	Média
TSP	1.500 aC	2.011 aB	2.125 aB	2.317 aA	1.988 a
GAFFA	1.499 aC	1.629 bBC	1.734 bB	2.061 abA	1.731 b
DAQUI	1.480 aC	1.560 bBC	1.677 bB	1.913 bA	1.658 c
ARAD	1.495 aC	1.538 bBC	1.680 bB	1.906 bA	1.655 c
Média	1.494 D	1.685 C	1.804 B	2.049 A	

Fonte: EMBRAPA - CNPT (1988) citado por VITTI (2002).

Efeito de doses de P sobre a produtividade de feijoeiro



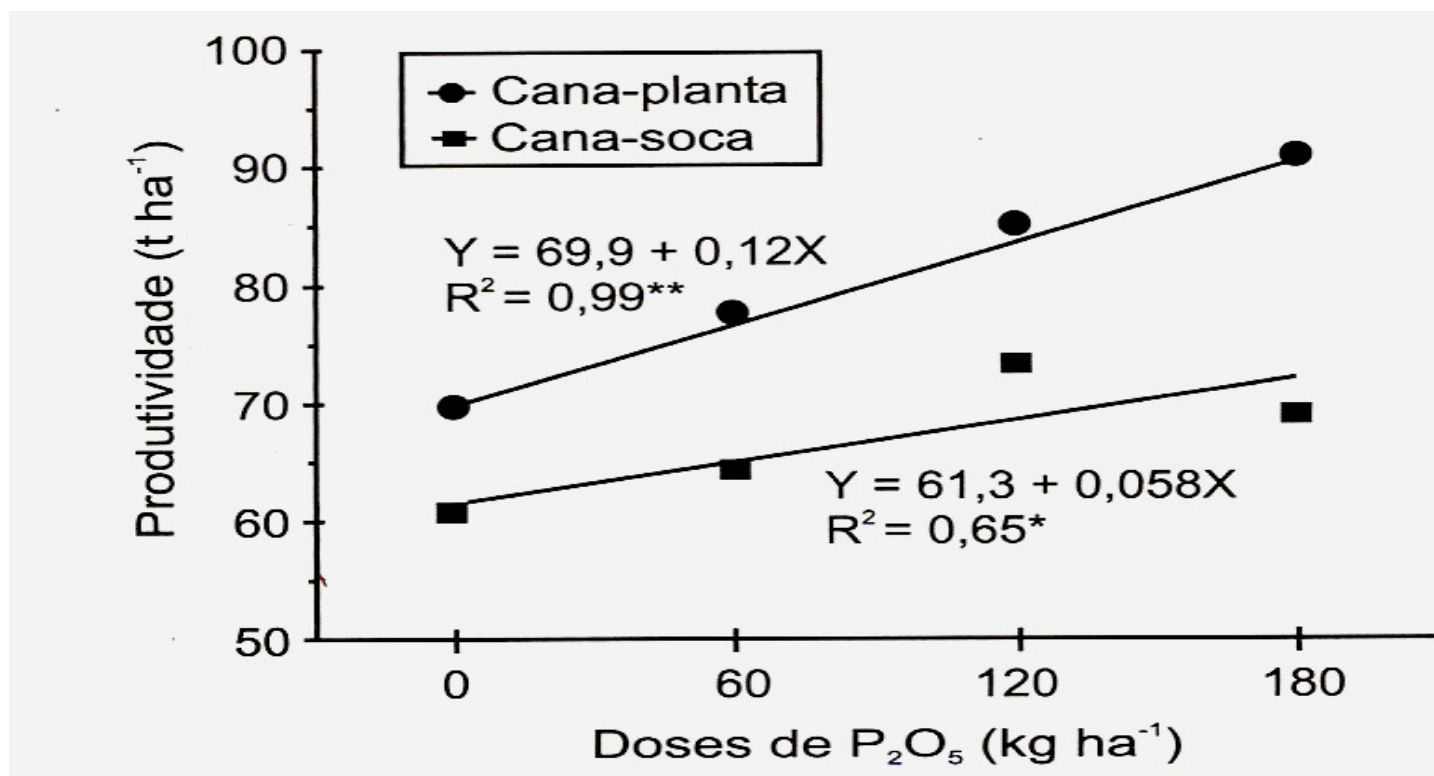
P₂O₅ - kg ha⁻¹

P solo: 0-5= 48; 5-10= 40; 10-30= 27 mmol_c dm⁻³

Argila: 0-5= 16; 5-10= 19; 10-30= 19 %

R²= 0,6 ns

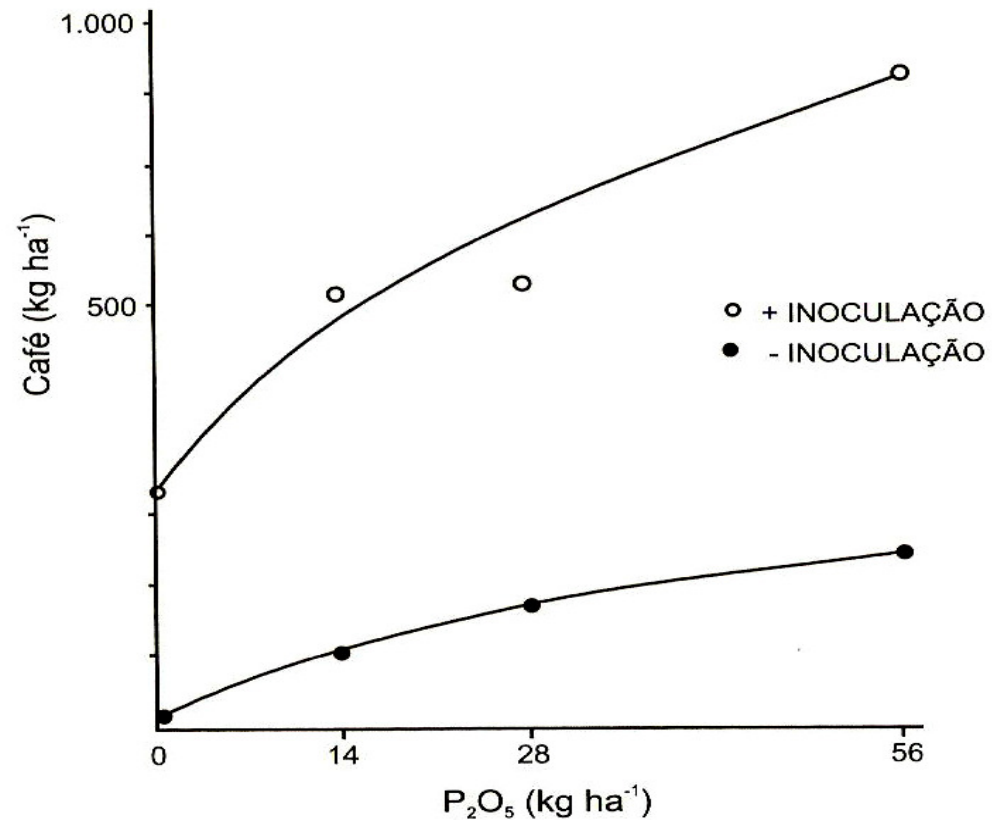
Efeito da adubação fosfatada na produção de cana-de-açúcar



Efeito de doses de P sobre a produção de cana-de-ano (12 meses) e da cana soca.

Fonte: Korndörfer, (2004).

Efeito das micorrizas no café



Efeito da inoculação com *Gigaspora margarita* no crescimento e na produção do cafeeiro.

Fonte: Malavolta, (2004) apud Lopes et al (1983).

Sintomas de deficiência de P

Sintomas de deficiência em P

- Visuais
 - Cor amarelada das folhas, principalmente nas mais velhas
 - Pouco brilho, cor verde-azulada ou manchas pardas;
 - Ângulos foliares mais agudos
 - Gemas laterais dormentes
 - Número reduzido de frutos e de sementes
 - Atraso no florescimento

Sintomas de deficiência em P

- Químicos

- Aumento de pigmentos vermelhos ou roxos em algumas espécies;
- Aumento do teor de carboidratos solúveis;
- Aumento da relação P_o/P_i .

- Anatômicos

- Provavelmente só indiretos como:
- Indução de deficiência de alguns elementos como Co, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn.

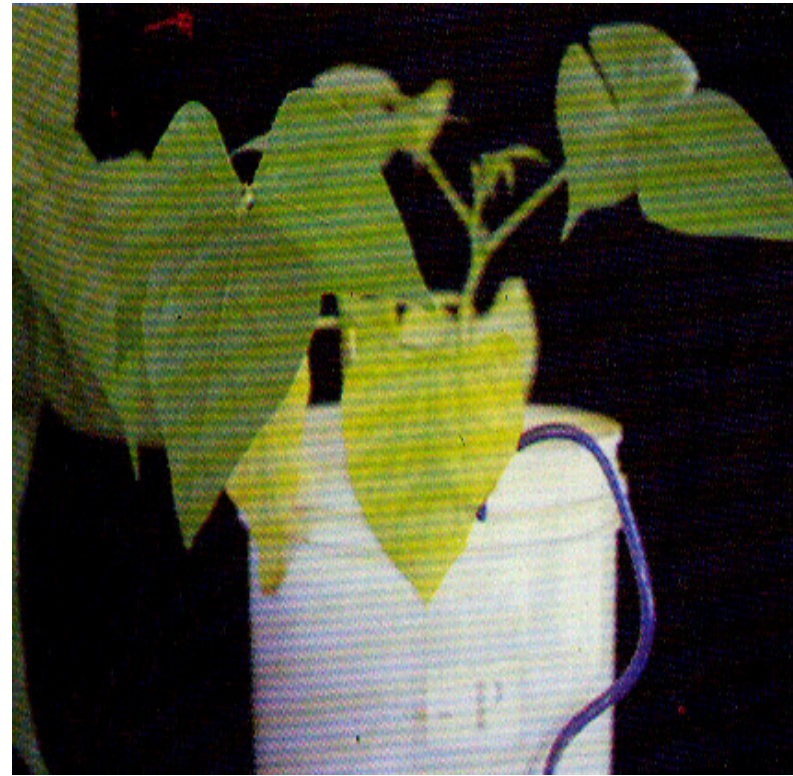
Deficiência de P em plantas

Feijoeiro



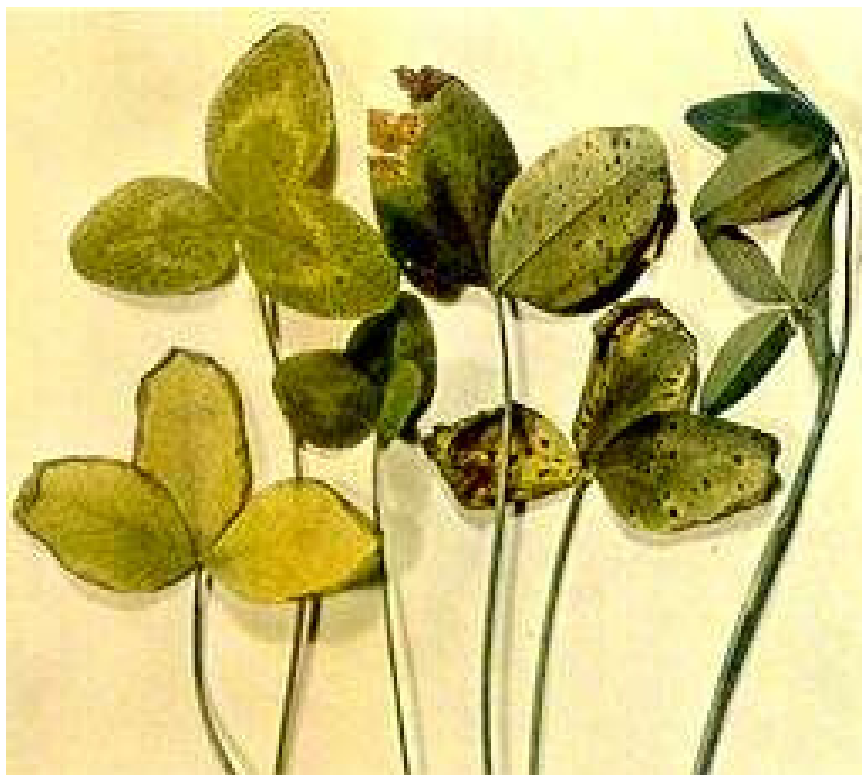
Sintoma de deficiência de P em feijoeiro.

Fonte: [www.potafos.org/ppiweb/gbrazil.nsf/\\$webindex/..](http://www.potafos.org/ppiweb/gbrazil.nsf/$webindex/..)



Cor amarelada das
folhas mais velhas.

Deficiência de P em trevo



**Folhas de trevo
vermelho com
pequenos pontos
de bronze.**

Sintoma de deficiência de P em trevo vermelho.

Fonte: <http://www.uralkali.com/portal/page>.

Deficiência de P milho

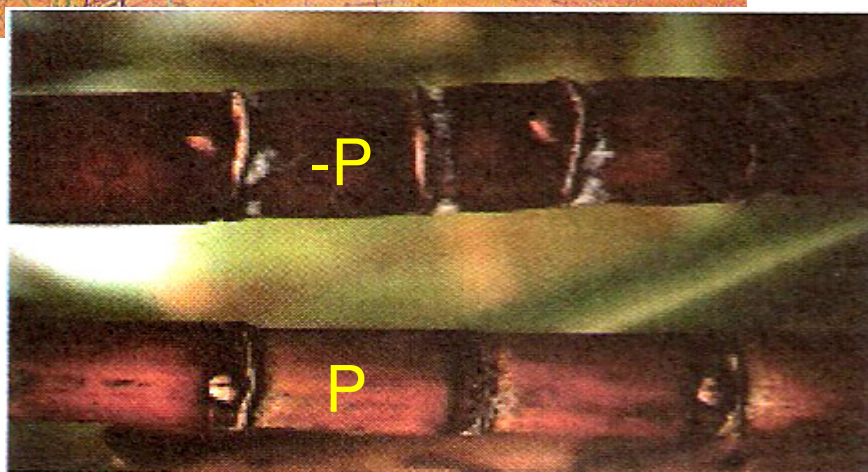


Fonte: [www.potafos.org/ppiweb/gbrazil.nsf/\\$webindex/..](http://www.potafos.org/ppiweb/gbrazil.nsf/$webindex/..)

Deficiência de P em milho



Deficiência de P em cana



Sintomas de deficiência de P em cana-de-açúcar.

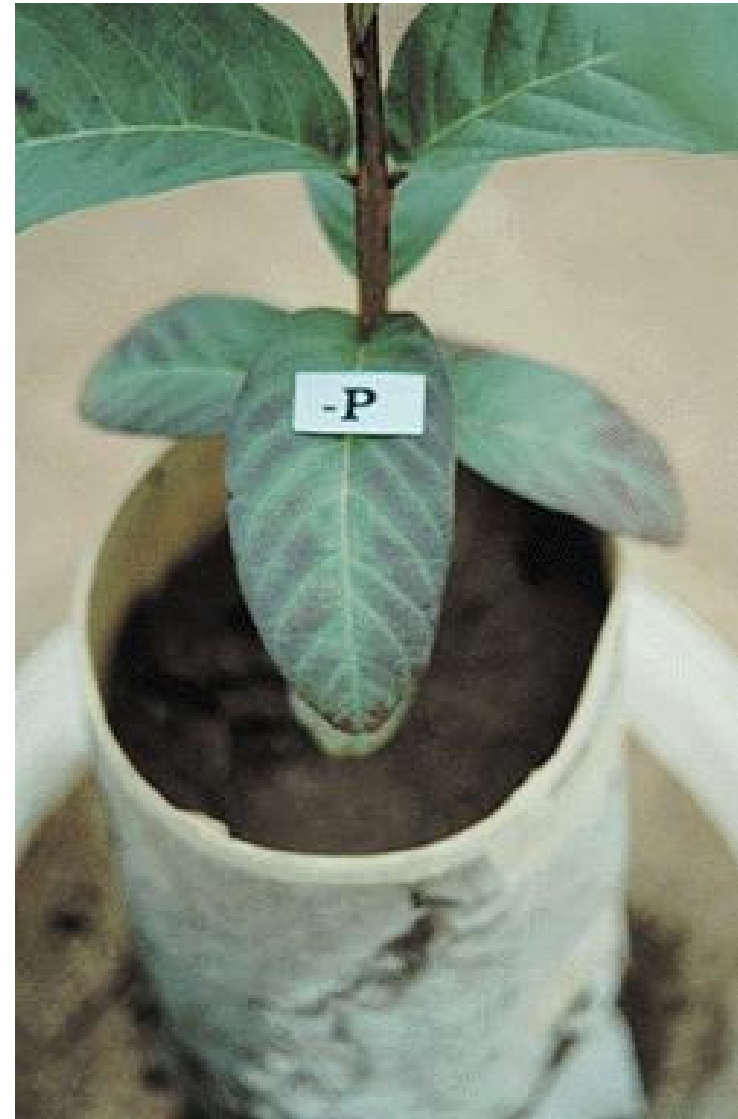
Fonte: Yamada, (1994).

Fonte: Korndörfer, (2004).

Cana

- Lâminas foliares verde-escuras a verde-azuladas; coloração vermelha ou roxa aparece freqüentemente, particularmente nas pontas e margens expostas diretamente à luz do sol; folhas mais finas, mais estreitas e mais curtas que o normal; folhas mais velhas amarelas, eventualmente definhando a partir das pontas e ao longo das margens; colmos menores e mais finos; perfilhamento escasso ou ausente.

Deficiência de P em goiaba



Deficiência de P em pinus



Amarelamento das acículas, que podem dispor-se em forma de mosaico, após ficam violáceas.

Sintoma de deficiência de P em pinus.

Fonte: http://www.pr.nrcs.usda.gov/technical/Agronomy/deficiencias_nutricionales.htm.

Deficiência de P batata



Sintoma de deficiência de P em batata.

Atraso do crescimento nas partes terminais, plantas pequenas delgadas e ligeiramente rígidas, com folhas enrugadas, e coloração mais escura que o normal.

Fonte: http://www.pr.nrcs.usda.gov/technical/Agronomy/deficiencias_nutricionales.htm

Deficiência de P em arroz



**Plantas ficam pequenas
comparada com as normais**

Sintoma de deficiência de P em arroz.

Fonte: http://www.pr.nrcs.usda.gov/technical/Agronomy/deficiencias_nutricionales.htm

Deficiência de P em eucalipto



Sintoma de deficiência de P em eucalipto.

Fonte: Silveira *et al.*, (2004).

As folhas velhas ficam com coloração verde escura, mostrando-se arroxeadas próximo às nervuras e com pontuações escuras ao longo do limbo. No estágio final, as pontuações tornam-se necróticas.

Revisão

Forma absorvida	H_2PO_4^-
Forma incorporada	H_2PO_4^-
Mobilidade na planta	móvel
Funções	Armazenamento e transferência de energia
Deficiência	Menor crescimento aéreo e radicular, cor amarelada ou púrpura nas folhas mais velhas