

# Gli elementi della nutrizione minerale delle piante

Elemento	Ruolo
<u>Carbonio</u>	Componente dell'organizzazione molecolare di tutte le biomolecole (carboidrati, proteine, lipidi, acidi nucleici, alcaloidi, etc.).
<u>Ossigeno</u>	Come il carbonio partecipa alla costituzione molecolare di tutte le biomolecole.
<u>Idrogeno</u>	Componente della costituzione molecolare di tutte le biomolecole. Svolge un ruolo funzionale nel controllare il bilancio ionico, il potenziale di membrana, i processi redox. Fondamentale nel trasferimento dell'energia.
<u>Azoto</u>	Componente della costituzione molecolare di biomolecole quali proteine, acidi nucleici, ormoni, clorofilla, vitamine, enzimi.
<u>Fosforo</u>	Coinvolto nei processi di trasferimento dell'energia. Componente della costituzione molecolare di lipidi, acidi nucleici e, negli organi di riserva, della fitina.
<u>Zolfo</u>	Componente della costituzione molecolare di biomolecole quali amminoacidi, enzimi, cofattori e vitamine. Coinvolto nei processi biosintetici e di trasferimento dell'energia.
<u>Potassio</u>	Ruolo funzionale, stabilizza la conformazione di molti enzimi. Partecipa ai meccanismi di regolazione osmotica e di controllo del bilancio idrico, ionico e del turgore cellulare. Coinvolto nella traslocazione dei prodotti della fotosintesi. Contrasta gli effetti di stress.
<u>Calcio</u>	È necessario per la distensione e la divisione cellulare. Mantiene l'integrità della cellula e la permeabilità delle membrane. Coinvolto nella traslocazione dei carboidrati. Mitiga l'azione tossica dei metalli pesanti. Favorisce l'infezione nodulare dei rizobi.
<u>Magnesio</u>	Componente della clorofilla. Cofattore enzimatico coinvolto nei processi di trasferimento di energia e del fosfato. Stabilizza i ribosomi nella sintesi delle proteine.
<u>Ferro</u>	Cofattore enzimatico nelle ossidoriduttasi partecipa al trasferimento di energia. Coinvolto nella biosintesi della clorofilla nei cloroplasti e nella riduzione di S e N.

Gli organismi viventi si comportano come sistemi altamente selettivi che concentrano al loro interno gli elementi della nutrizione minerale prelevandoli dall'ambiente circostante (aria, acqua e suolo).

### Litosfera

### Cellula vegetale

----- % (p/p) -----		-----	
Ossigeno (O)	46.7	Carbonio (C)	45
Silicio (Si)	27.7	Ossigeno (O)	45
Alluminio (Al)	8.1	Idrogeno (H)	6
Ferro (Fe)	5.1	Azoto (N)	1.5
Calcio (Ca)	3.7	Potassio (K)	1.0
Sodio (Na)	2.8	Calcio (Ca)	0.5
Potassio (K)	2.6	Magnesio (Mg)	0.2
Magnesio (Mg)	2.1	Fosforo (P)	0.2
Altri	1.2	Zolfo (S)	0.1
		Ferro (Fe)	0.01

# Gli elementi essenziali e le forme chimiche della nutrizione minerale delle piante

**Table 37.1 Essential Nutrients in Plants**

Element	Form Available to Plants	Major Functions
<b>Macronutrients</b>		
Carbon	CO <sub>2</sub>	Major component of plant's organic compounds
Oxygen	CO <sub>2</sub>	Major component of plant's organic compounds
Hydrogen	H <sub>2</sub> O	Major component of plant's organic compounds
Nitrogen	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Component of nucleic acids, proteins, hormones, and coenzymes
Sulfur	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Component of proteins, coenzymes
Phosphorus	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Component of nucleic acids, phospholipids, ATP; several coenzymes
Potassium	K <sup>+</sup>	Cofactor that functions in protein synthesis; major solute functioning in water balance; operation of stomata
Calcium	Ca <sup>2+</sup>	Important in formation and stability of cell walls and in maintenance of membrane structure and permeability; activates some enzymes; regulates many responses of cells to stimuli
Magnesium	Mg <sup>2+</sup>	Component of chlorophyll; activates many enzymes
<b>Micronutrients</b>		
Chlorine	Cl <sup>-</sup>	Required for water-splitting step of photosynthesis; functions in water balance
Iron	Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup>	Component of cytochromes; activates some enzymes
Boron	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cofactor in chlorophyll synthesis; may be involved in carbohydrate transport and nucleic acid synthesis
Manganese	Mn <sup>2+</sup>	Active in formation of amino acids; activates some enzymes; required for water-splitting step of photosynthesis
Zinc	Zn <sup>2+</sup>	Active in formation of chlorophyll; activates some enzymes
Copper	Cu <sup>+</sup> , Cu <sup>2+</sup>	Component of many redox and lignin-biosynthetic enzymes
Molybdenum	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Essential for nitrogen fixation; cofactor that functions in nitrate reduction
Nickel	Ni <sup>2+</sup>	Cofactor for an enzyme functioning in nitrogen metabolism

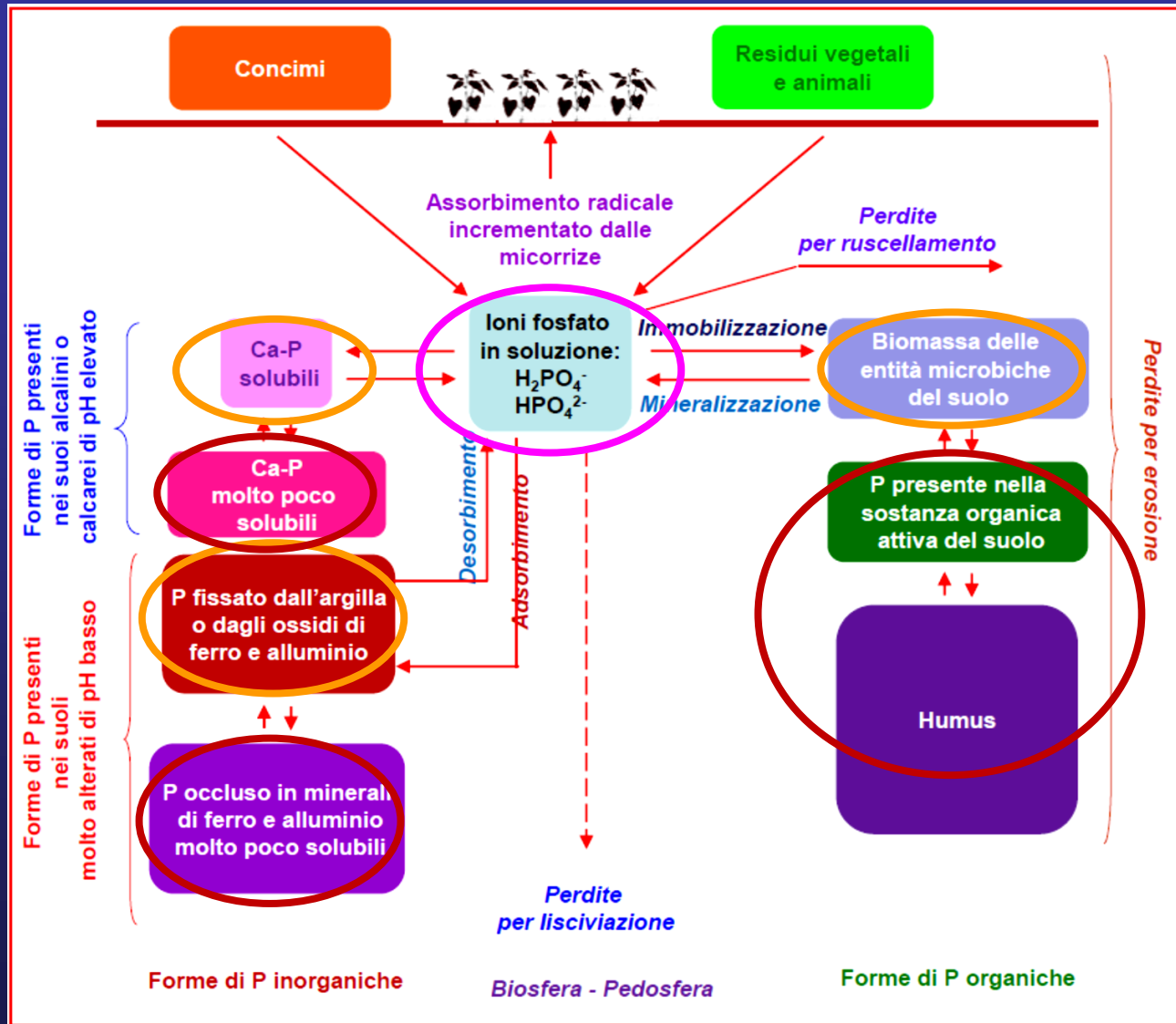
Ciascuno di essi svolge una specifica funzione fisio-metabolica nella cellula vegetale. Questi elementi sono quindi essenziali per la crescita e lo sviluppo della pianta.

Il contenuto di  $P_{\text{tot}}$  nei suoli delle terre emerse varia tra 0.005% (0.05 g kg<sup>-1</sup>) e 0.15% (1.5 g kg<sup>-1</sup>) e dipende da:

- ✓ il tipo di matrice litologica che ha originato il suolo
- ✓ il grado di alterazione pedogenetica
- ✓ le condizioni climatiche
- ✓ l'erosione
- ✓ il ruscellamento
- ✓ la concimazione fosfatica

Il P non subisce variazioni nello stato redox ed è sempre presente come fosfato, ovvero come *anione dell'acido ortofosforico*. I fosfati presenti nel suolo si accertano in forma sia inorganica sia organica a costituire i compartimenti (*pool*) del P solubile in acqua, *labile* (poco disponibile), *non labile* (fissato o lentamente disponibile).

# Il ciclo globale del fosforo



(da Violante, 2013)

## Apporti

- Concimazione
- Interramento dei residui colturali
- Alterazione dei costituenti minerali
- Mineralizzazione della SOM

## Perdite

- Asportazioni colturali
- Lisciviazione
- Erosione

Pool solubile

Pool labile

Pool non labile

Il P (fosfato) ha un ciclo biogeochimico sedimentario

# I pool del fosforo nel suolo

I fosfati presenti nel suolo si accertano in forma inorganica e organica, comunemente come anioni dell'acido ortofosforico [H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>].

Con riferimento alla nutrizione delle piante, possono essere suddivisi in tre frazioni:

- fosfati in **soluzione prontamente disponibili per le piante**

- fosfati del **pool labile**

*precipitati o adsorbiti sugli scambiatori del suolo e in equilibrio con i fosfati in fase liquida.*

*Nel tempo, gli ioni fosfato adsorbiti tendono a evolvere in strutture cristalline con conseguente forte limitazione della mobilità del nutriente*

- fosfati del **pool non labile**

*presenti come minerali primari del fosforo, come sali insolubili di Ca, Fe, Al, fissati da polimeri Al(OH)<sub>x</sub> sulle superfici argillose, occlusi da sesquiossidi di ferro e alluminio, parti dell'organizzazione molecolare dell'humus*

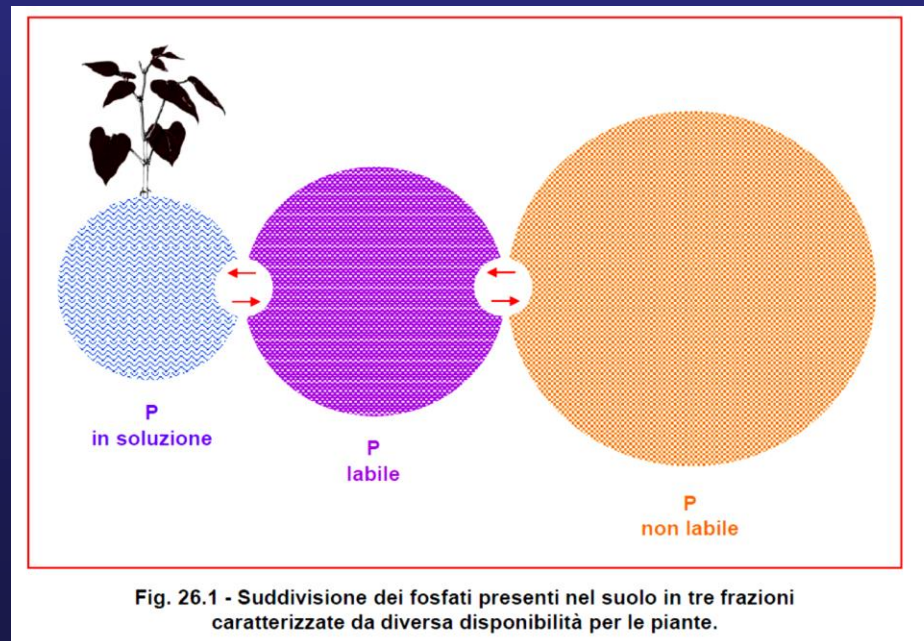


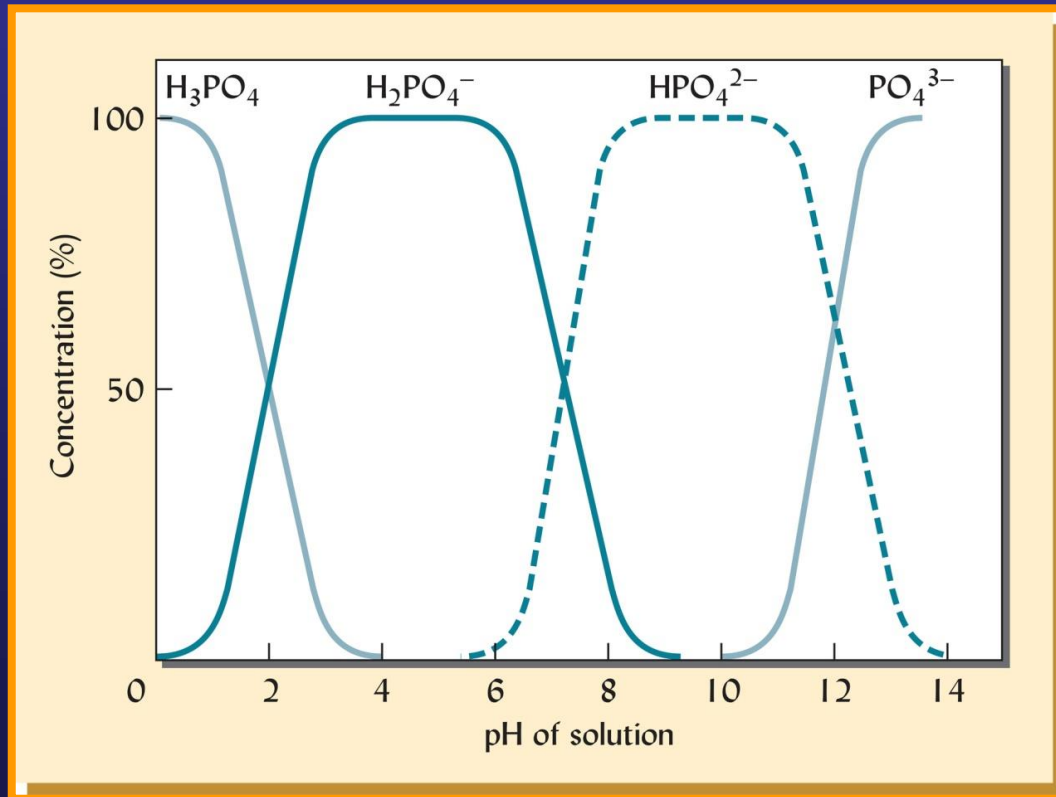
Fig. 26.1 - Suddivisione dei fosfati presenti nel suolo in tre frazioni caratterizzate da diversa disponibilità per le piante.



# I pool del fosforo nel suolo

## Fosforo solubile (fosfati in soluzione)

La forma chimica del fosfato presente nella fase liquida del suolo è controllata dal grado di reazione (pH)



$$\text{pK}_{a1} = 2.15 \quad \text{pK}_{a2} = 7.20 \quad \text{pK}_{a3} = 12.32$$

# I pool del fosforo nel suolo

## Fosforo solubile (fosfati in soluzione)

Nutriente	mg · L <sup>-1</sup>	μM
Cl <sup>-</sup>	60 - 600	2000 - 20000
S [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	50 - 500	500 - 5000
Ca <sup>2+</sup>	30 - 300	800 - 8000
Mg <sup>2+</sup>	5 - 50	200 - 2000
Si [(Si(OH) <sub>4</sub> ]	10 - 50	400 - 2000
K <sup>+</sup>	1 - 10	20 - 200
Na <sup>+</sup>	0.5 - 5	20 - 200
F <sup>-</sup>	0.1 - 0.5	5 - 20
Mn <sup>2+</sup>	0.1 - 10	2 - 20
Cu <sup>2+</sup>	0.03 - 0.3	0.5 - 5
P [H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ]	0.002 - 0.03	0.06 - 1
Mo [HMoO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ]	0.001 - 0.01	0.01 - 0.1
Al [Al(OH) <sup>2+</sup> ]	<0.01	<0.4
Fe <sup>2+</sup> + Fe(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	<0.005	<0.01
Zn <sup>2+</sup>	<0.005	<0.01

Concentrazione di alcuni nutrienti nella soluzione di suoli delle regioni temperate  
(modificata da Murrman e Koutz, 1972)

Nei suoli lautamente concimati ed in condizioni pedoclimaticamente favorevoli la concentrazione di fosfato nella fase liquida del suolo può arrivare a 1 mg L<sup>-1</sup>.  
Concentrazione ottimale per la nutrizione minerale delle piante è **0.2 mg P-fosfato L<sup>-1</sup>**.





# I pool del fosforo nel suolo

## Fosforo solubile (fosfati in soluzione)

**Table 14.7**

**SOIL SOLUTION PHOSPHORUS CONCENTRATION REQUIRED FOR 95%  
MAXIMUM GROWTH OF VARIOUS PLANTS**

Plant	Approximate P in soil solution, mg/L
Cassava	0.005
Peanut	0.01
Corn	0.05
Sorghum	0.06
Cabbage	0.04
Soybean	0.20
Tomato	0.20
Head lettuce	0.30

Based on selected data in from Fox (1981).

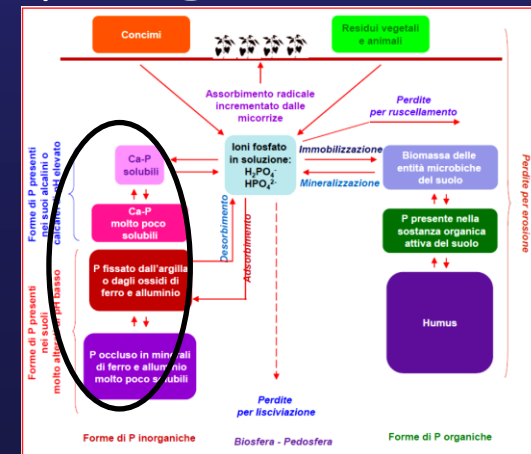
*(da Weil & Brady, 2017)*

Without help from arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), most crop plants require a concentration of about  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  in the soil solution for optimum growth.

# I pool del fosforo nel suolo

## Forme inorganiche del fosforo nel suolo

- ❖ Fosforo adsorbito sulle superfici di scambio anionico (*pool labile*)
- ❖ Fosforo fissato sulle superfici di scambio anionico (in suoli a **pH acido**) (*pool non labile*)
- ❖ Fosforo precipitato in composti del P-inorganico (in suoli a pH alcalino) (*pool non labile*)
- ❖ Fosforo costitutivo delle rocce fosfatiche e dei fosfati di Fe e di Al (caratteristica pedogenetica) (*pool non labile*)



# Principali forme minerali del fosforo inorganico nel suolo: rocce fosfatiche e fosfati di ferro e di alluminio

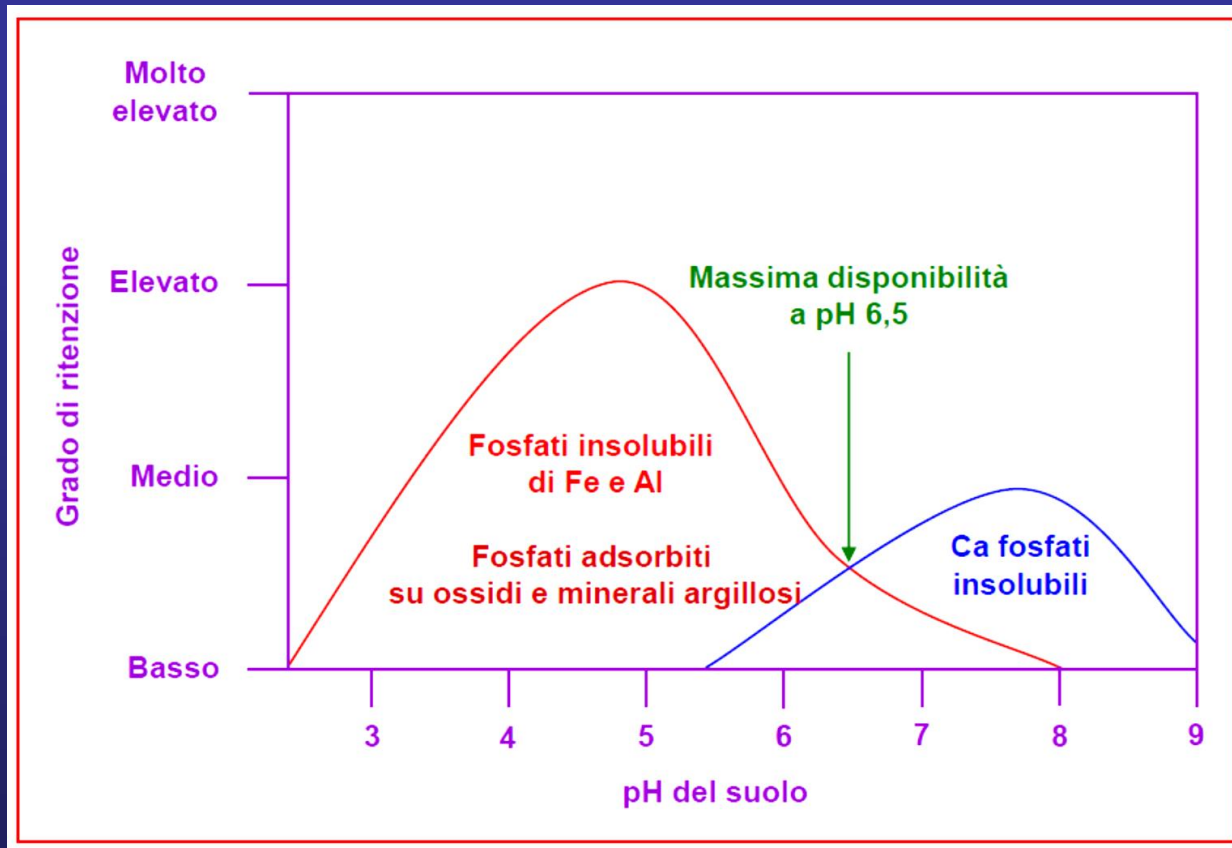
**Table 14.5**

## **INORGANIC PHOSPHORUS-CONTAINING COMPOUNDS IMPORTANT FOR SOILS**

*In each group, the compounds are listed in order of increasing solubility.*

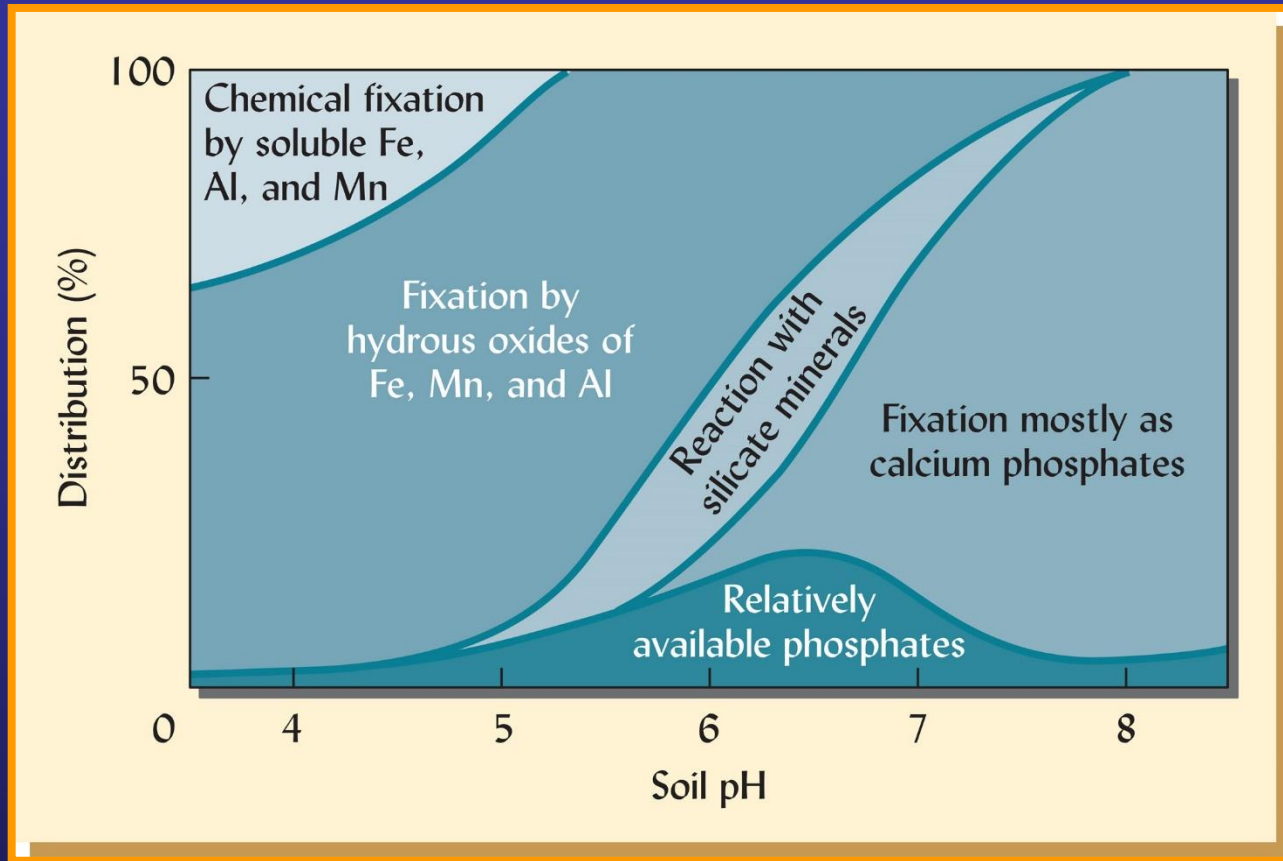
Compound	Formula
Iron and aluminum compounds	
Strengite	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Variscite	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Calcium compounds	
Fluorapatite	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaF}_2$
Carbonate apatite	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaCO}_3$
Hydroxy apatite	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$
Oxyapatite	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaO}$
Tricalcium phosphate	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
Octacalcium phosphate	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Dicalcium phosphate	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Monocalcium phosphate	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Magnesium compound	
Struvite	$\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

# Disponibilità, precipitazione e fissazione del fosfato nel suolo



L'intensità dei processi di fissazione e di precipitazione del fosforo inorganico è controllata da molteplici fattori pedogenetici e chimici del suolo, in particolare dalla mineralogia e dal pH.

# Inorganic fixation of added phosphates at various soil pH values

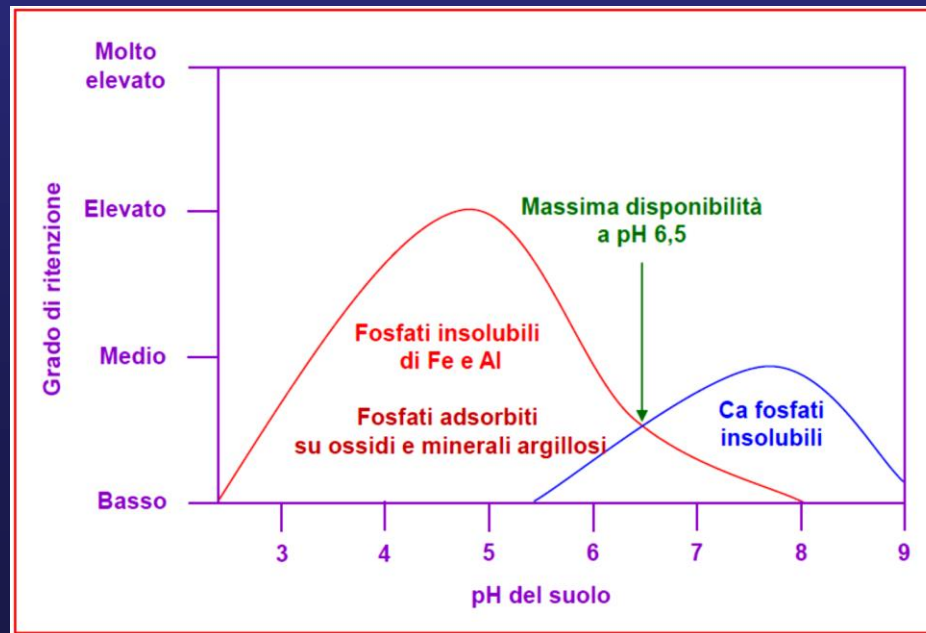
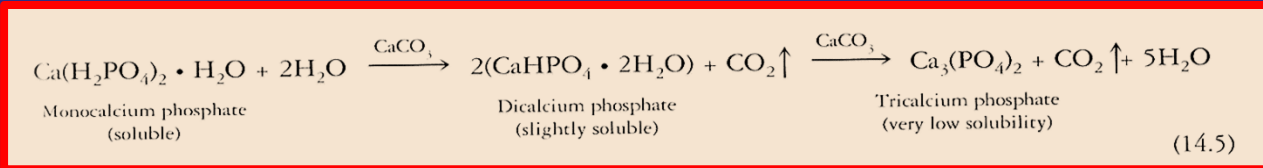


(da Weil & Brady, 2017)

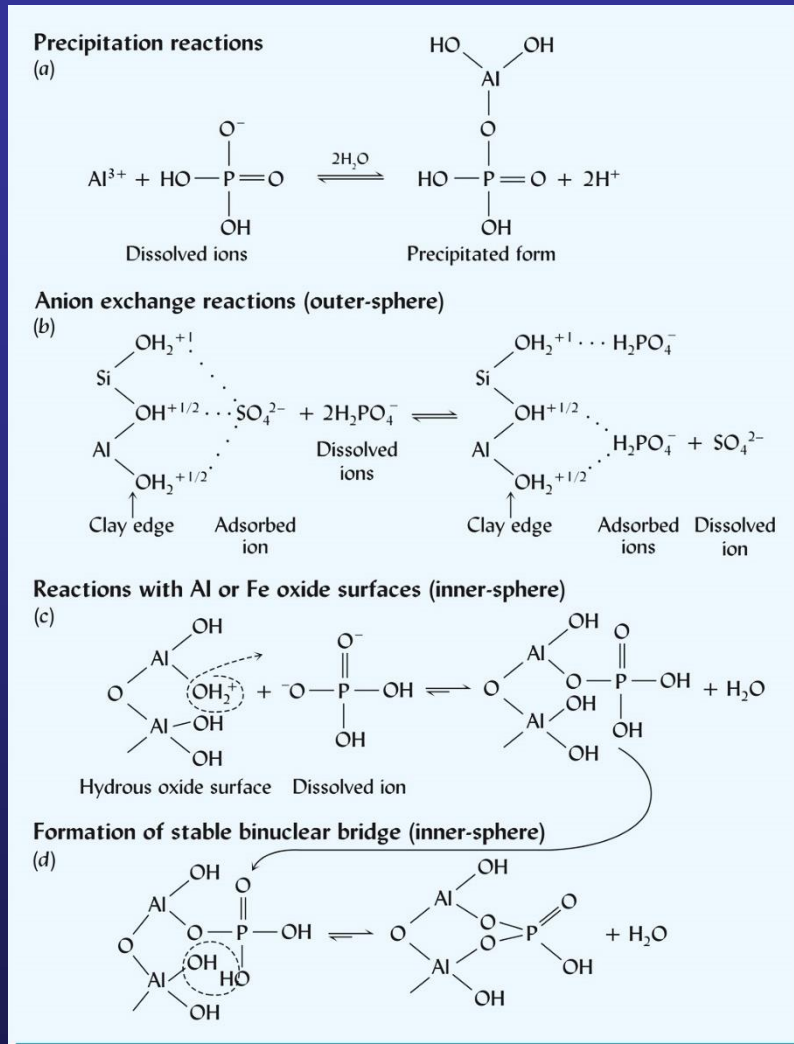
Average conditions are represented and any particular soil would have a somewhat different distribution. The actual proportion of the phosphorus remaining in an available form will depend upon contact with the soil, time for reaction, and other factors. It should be kept in mind that some of the added phosphorus may be changed to organic forms in which it would be temporarily unavailable but subject to mineralization. (Diagram courtesy of N. Brady and Ray R. Weil).

# Precipitazione del fosforo inorganico in suoli a pH alcalino

Nei suoli alcalini (pH ~8.0) e con un alto grado di saturazione in calcio gli ioni solubili  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , somministrati con la concimazione fosfatica, reagiscono con gli ioni  $\text{Ca}^{2+}$  per generare una sequenza di prodotti a decrescente solubilità. La dinamica di precipitazione del fosfato è controllata dal pH, dal contenuto in ioni calcio e dal contenuto idrico del suolo.



# Fissazione del fosforo inorganico in suoli a pH acido



(da Weil & Brady, 2017)

Chemical precipitation by soluble Al, Fe, Mn

The phosphate is *reversibly* adsorbed by anion exchange with hydrous oxides.

A phosphate ion replaces an  $-\text{OH}_2$  or an  $-\text{OH}$  group in the surface structure of Al or Fe hydrous oxide minerals

The phosphate further penetrates the mineral surface by forming a *stable binuclear bridge*.

Il fosfato solubile subisce dinamiche chimiche di superficie che ne riducono progressivamente la disponibilità per la nutrizione minerale della pianta.

# Diversa capacità di fissare il fosfato in funzione dei minerali presenti nella fase solida del terreno

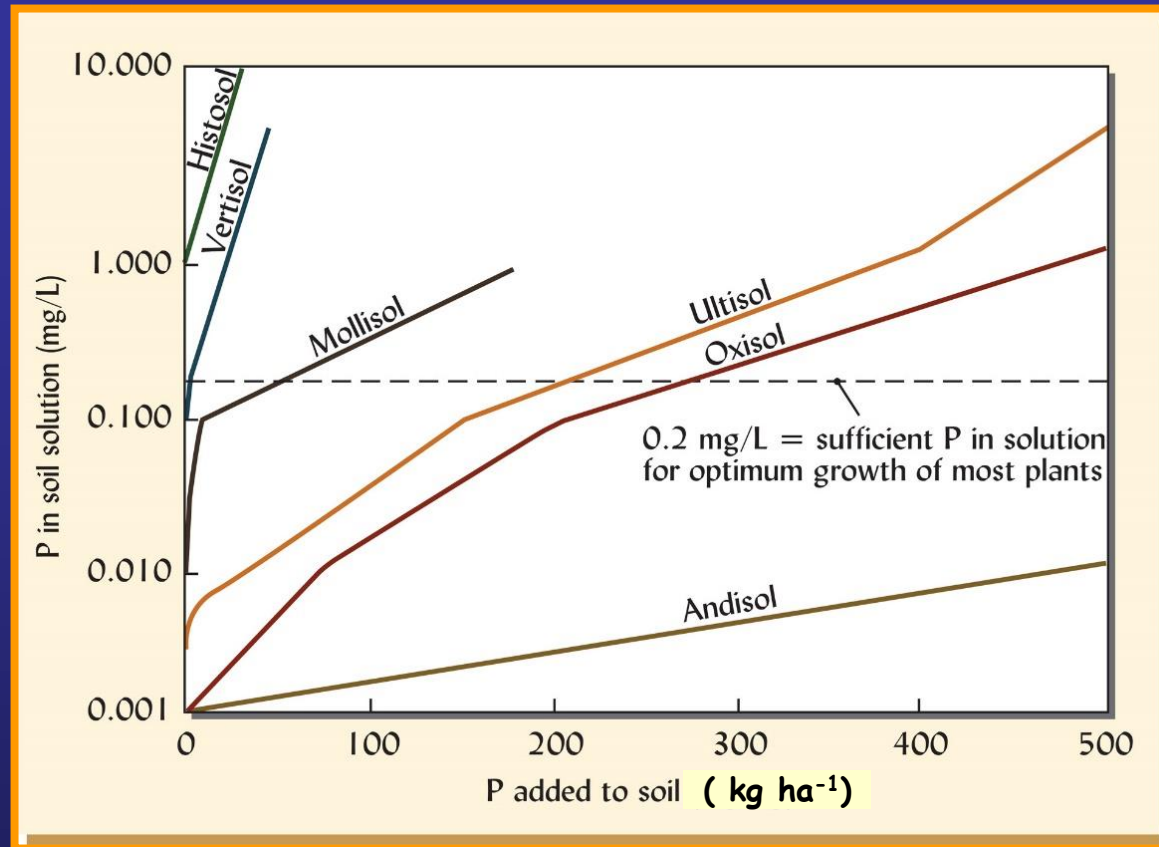
I minerali del suolo capaci di bloccare più fortemente il fosforo sono nell'ordine: **allofane, imogolite, materiali amorfi** > **Al, Fe, Mn ossidi a scarso ordine di cristallinità** > **Al, Fe, Mn ossidi cristallini** > **carbonati** > **minerali argillosi di tipo 1:1** >> **minerali argillosi di tipo 2:1** > **quarzo e humus**

Quantità di fosforo fissata (mg · kg <sup>-1</sup> di suolo)	Capacità di fissazione	Tipo di minerali presenti nella frazione solida
<10	Molto bassa	Quarzo, sostanza organica
10-100	Bassa	Minerali argillosi di tipo 2:1
101-500	Media	Minerali argillosi di tipo 1:1, Fe e Al ossidi cristallini e carbonati
501-1000	Elevata	Fe e Al ossidi caratterizzati a scarso ordine di cristallinità
>1000	Molto elevata	Allofane, imogolite, materiali amorfi

Suoli che fissano quantità di fosfato comprese tra 500 e 1000 mg kg<sup>-1</sup>, corrispondenti a ~1 e 4 t P-fissato ha<sup>-1</sup>, sono caratterizzati da un'elevata capacità di fissare il nutriente. Si dice che hanno anche un'elevata capacità per il fosforo limitandone la disponibilità, ma anche le perdite per dilavamento.



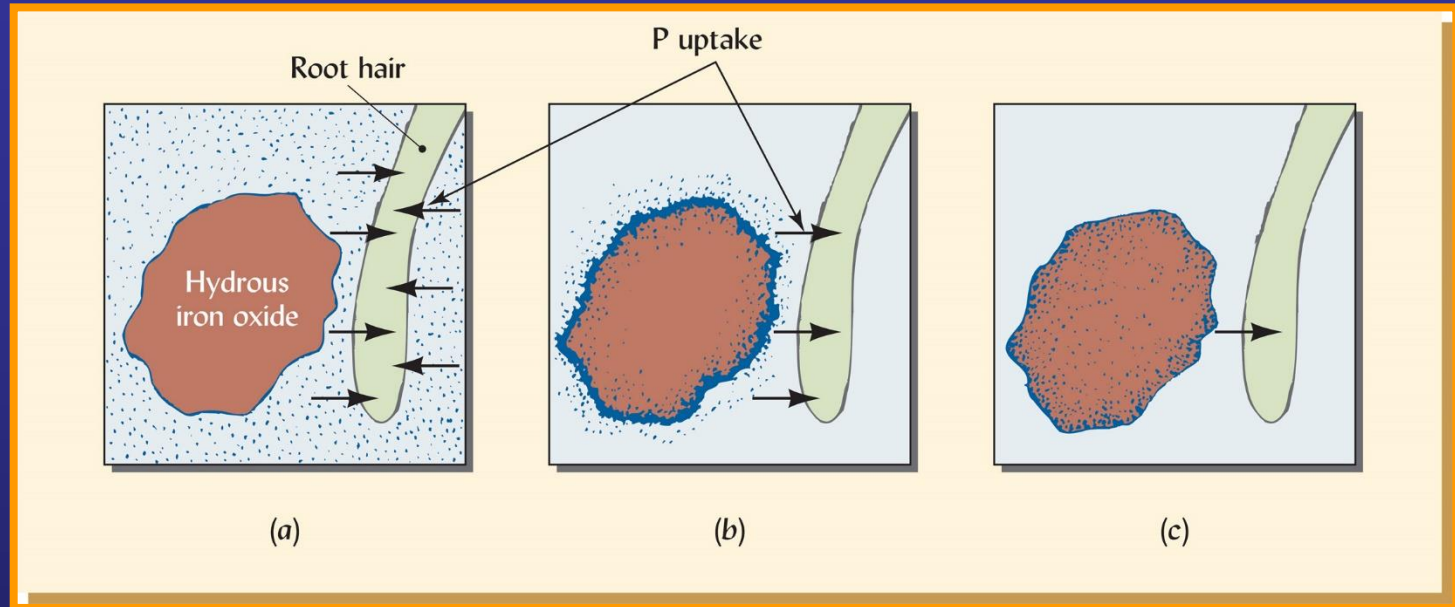
# I suoli hanno capacità differenziate di fissare il fosforo



(da Weil & Brady, 2017)

Typical soil solution levels of phosphorus when increasing amounts of fertilizer phosphorus are added to representative soils from several different orders. *Without help from mycorrhizal fungi*, most crop plants require a concentration of about 0.2 mg/L in the soil solution for optimum growth (see Table 14.7). The graph suggests very low phosphorus-fixing capacities of Histosols and Vertisols, making it possible for soils in these orders when initially cultivated to require little if any fertilizer to support good plant growth. In contrast, because of their high phosphorus-fixing capacities, unfertilized Ultisols and Oxisols would require a minimum of 200-300 kg P/ha for good plant growth, and Andisols would require many times this amount. Curves are representative of data from many sources and would not necessarily apply for a given soil in each order. P fixation could be increased if the soil has been long cultivated fertilizer or decreased if the soil has been so heavily fertilized with phosphorus that much of the soil's P-fixing capacity may already be satisfied. (Diagram courtesy of Ray R. Weil)

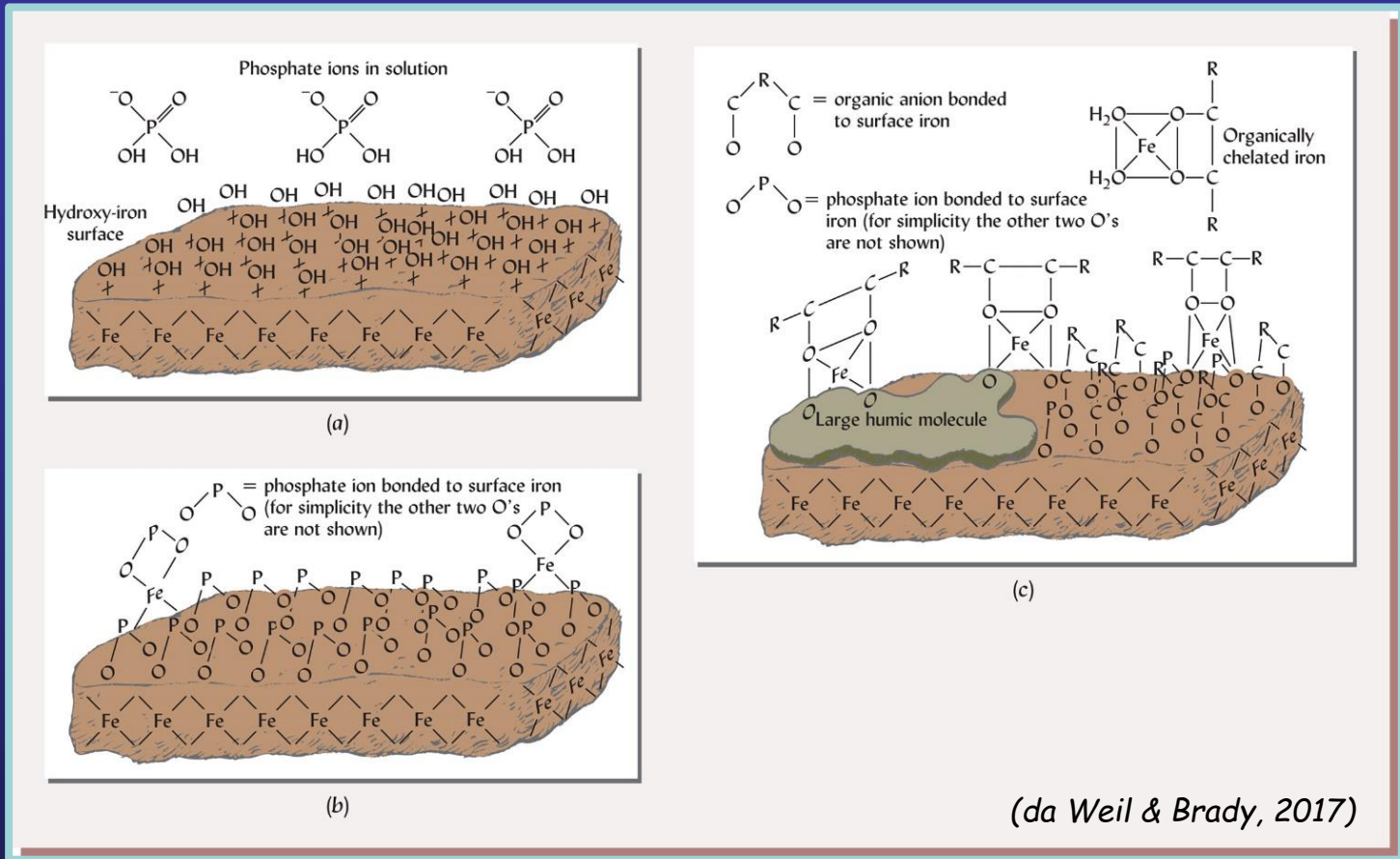
# Gli ossidi di Fe e Al diminuiscono la disponibilità per la pianta del fosforo inorganico distribuito con la concimazione minerale



(da Weil & Brady, 2017)

(a) The situation just after application of a soluble phosphate. The root hair and the hydrous iron oxide particle are surrounded by soluble phosphate ions (small dots). (b) Within a very short time most of the soluble phosphate has reacted with the surface of the iron oxide crystal. The phosphorus is still somewhat available to the plant roots, since most of it is located at the surface of the particle where exudates from the plant can encourage exchange. (c) In time the phosphorus penetrates the crystal, and only a small portion is found near the surface. Under these conditions its availability is very low.

# La sostanza organica può ridurre la fissazione del fosfato sulla superficie reattiva di un ossido o idrossido di Fe (o di Al)

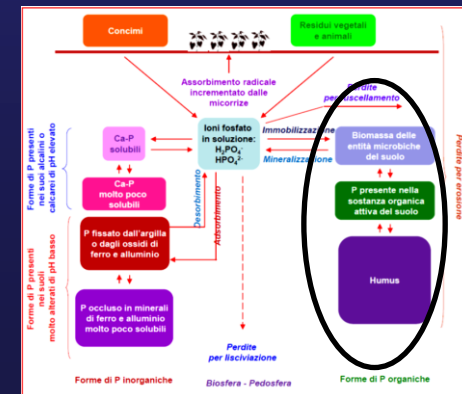


Anioni inorganici ed organici ad elevato peso molecolare possono ridurre il numero dei siti di adsorbimento fosfatico sulle superfici degli idrossidi di Fe (o di Al). Tale meccanismo spiega l'azione positiva svolta da pacciamanti ed ammendanti nel ridurre l'adsorbimento fosfatico e nell'aumentare la disponibilità di fosfato per la nutrizione minerale della pianta.

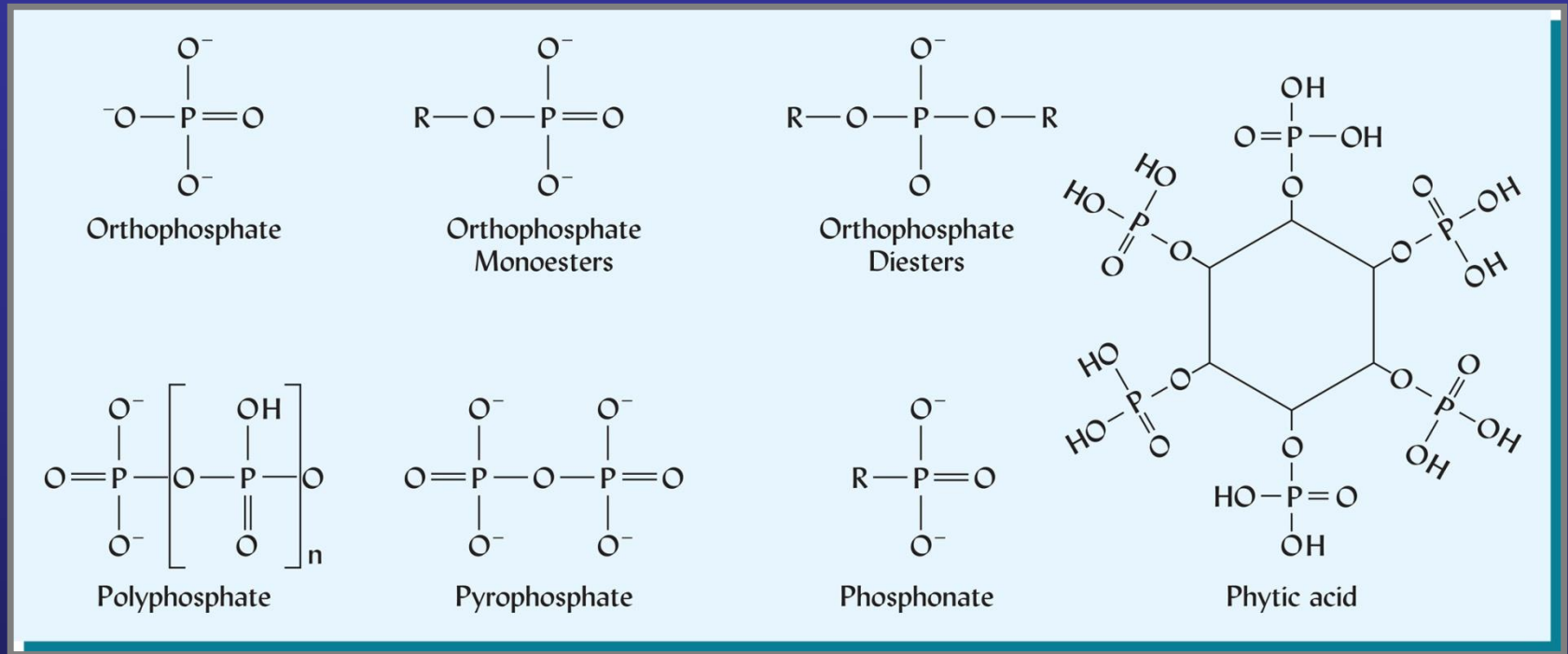
# I pool del fosforo nel suolo

## Forme organiche del fosforo nel suolo

- Quantità estremamente variabile nei suoli (20-80% del P totale), decresce lungo il profilo
- In parte è immobilizzato nella biomassa microbica
- La maggior parte del P-organico non microbico è costituita da esteri fosforici dell'inosite (30-90%), fosfolipidi (0.5-7%) ed acidi nucleici (0.2-2.4%).
- La coltivazione promuove la mineralizzazione del P-organico con conseguente rilascio di P-solubile.



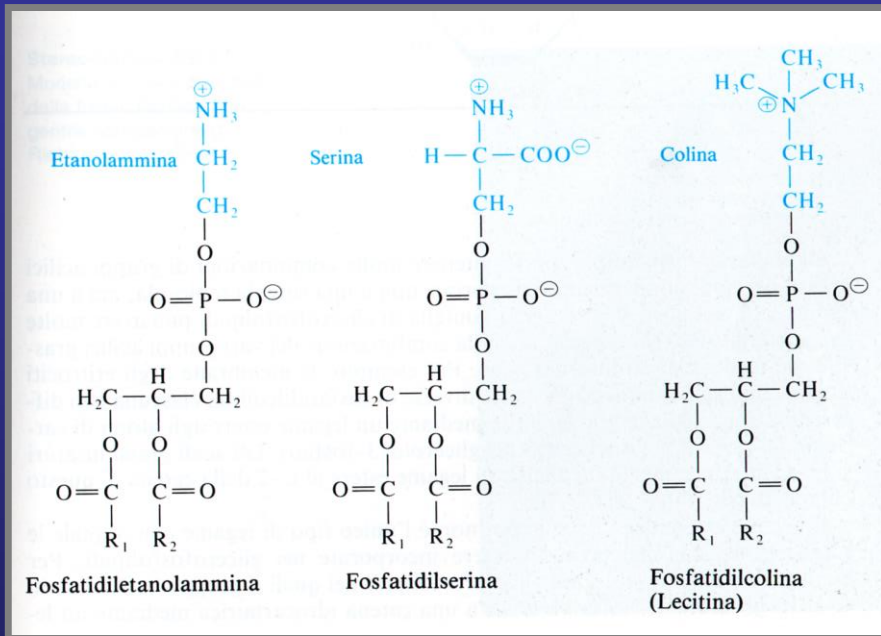
# Forme del P-organico rappresentate nel suolo



(da Weil & Brady, 2017)

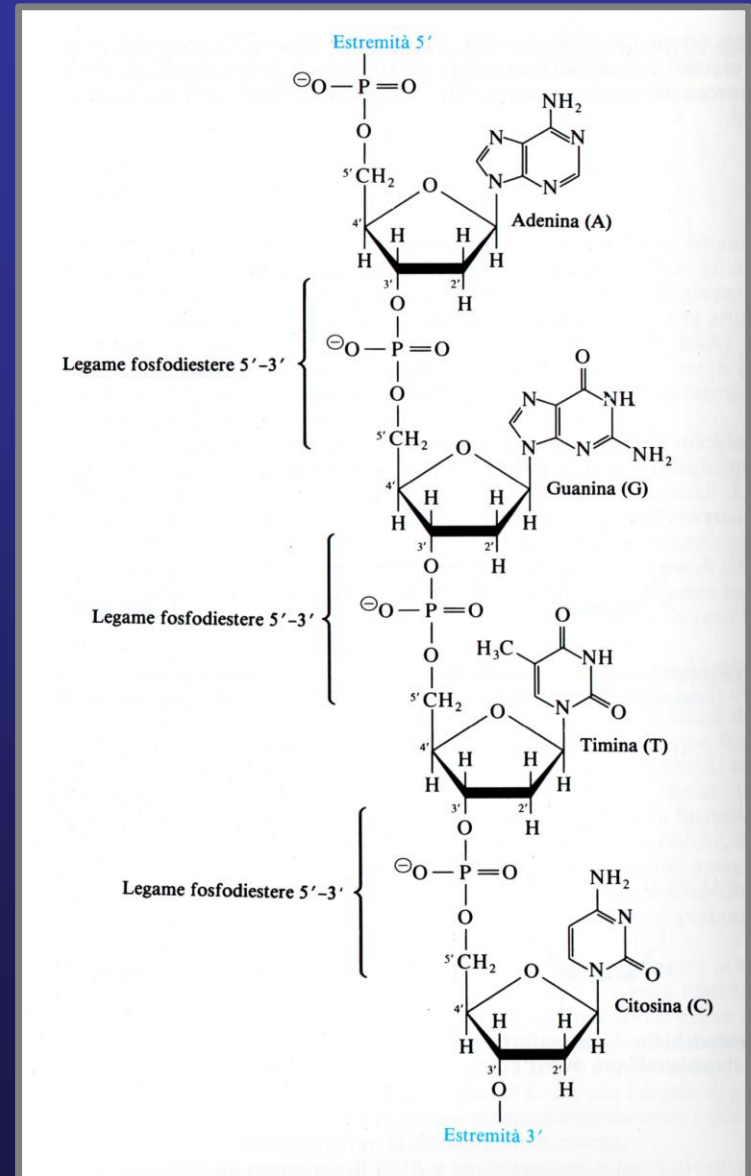
Types of organic phosphorus compounds commonly found in soils, where "R" stands for the rest of a larger organic molecule. Most organic soil phosphorus occurs as some form of phosphate ester. The inorganic orthophosphate ion is also represented (far left, upper). Phytic acid (far right), a plant storage molecule and example of a phosphate mono-ester, is one of the most plentiful organic phosphorus compounds in soils. The nucleic acids that comprise the genetic coding molecule, DNA, are examples of a phosphate di-esters common in small amounts in soils. (Diagram courtesy of Ray R. Weil).

# Forme del P-organico rappresentate nel suolo



I fosfolipidi sono costituenti delle pareti e delle membrane cellulari

Il DNA è una biomolecola informativa



# Contenuto di P organico in diverse tipologie di suoli

**Table 14.4**

**TOTAL PHOSPHORUS CONTENT OF SURFACE SOILS FROM DIFFERENT LOCATIONS AND THE PERCENTAGE OF TOTAL PHOSPHORUS IN THE ORGANIC FORM**

Soils	Number of samples	Total P, mg/kg	Organic fraction, %
New York			
Histosols (cultivated)	8	1491	52
Iowa			
Mollisols and Alfisols	6	561	44
Maryland			
Ultisols (silt loams)	6	650	59
Ultisols (forested sandy loams)	3	472	70
Ultisols (sandy loam, cropland)	4	647	25
Arizona	19	703	36
Australia	3	422	75
Texas			
Ustolls	2	369	34
Hawaii			
Andisol	1	4700	37
Oxisol	1	1414	19
Ethiopia highlands			
Vertisols	15	454	47
Zimbabwe			
Alfisols	22	899	56

Data for Iowa and Arizona from sources quoted by Brady (1974); Australia from Fares et al. (1974); New York from Cogger and Duxbury (1984); Hawaii from Soltanpour et al. (1988); Zimbabwe from Ray R. Weil and F. Folle, unpublished; Texas from Raven and Hossner (1993); Maryland (silt loams) from Weil et al. (1988); Maryland (sandy loams) from Vaithyanathan and Correll (1992); Ethiopian Vertisols from Tekalign et al. (1988).

# Immobilizzazione/mineralizzazione del fosfato

Il processo di **immobilizzazione** definisce la conversione del fosfato dalla forma inorganica alla forma organica come componente delle strutture cellulari dei microrganismi del suolo. Si verifica quando pervengono al suolo necromasse animali e vegetali con un elevato rapporto C:P. In carenza di fosforo, per soddisfare le proprie esigenze metaboliche, i microrganismi prelevano il fosfato disponibile dalla fase liquida del suolo immobilizzandolo nelle loro biomolecole.

Il processo opposto di **mineralizzazione** è controllato, oltre che dal rapporto C:P della matrice, da T, umidità, disturbo meccanico, etc. Nei climi temperati produce un rilascio medio di 5-20 kg P ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>.

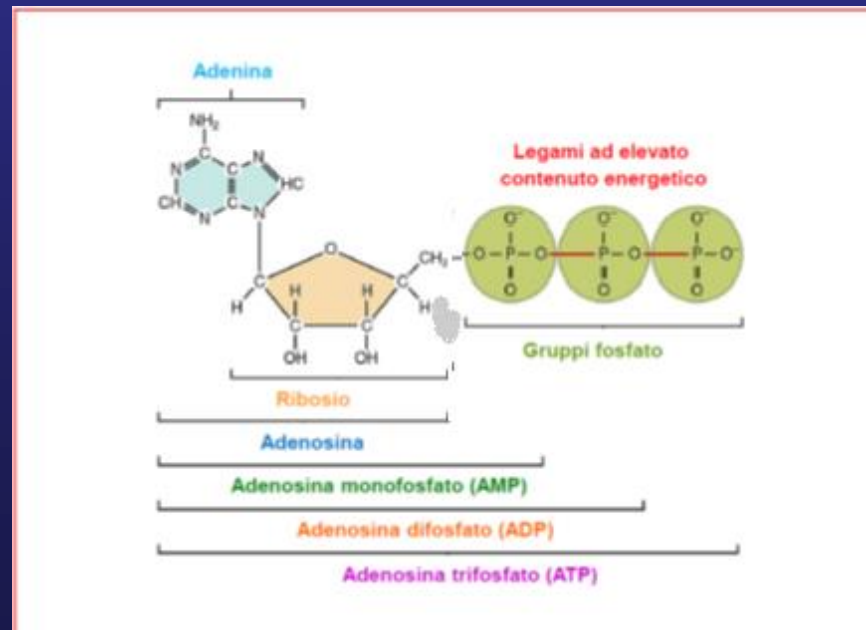
Valore del rapporto C:P	Mineralizzazione/Immobilizzazione
< 200	Mineralizzazione del fosforo organico (P <sub>o</sub> )
200 - 300	Nessuna perdita o aumento del fosforo inorganico (P <sub>i</sub> )
> 300	Immobilizzazione del fosforo inorganico (P <sub>i</sub> )



# Assorbimento nutrizionale del fosfato

Assorbito a livello radicale come ione ortofosfato ( $H_2PO_4^-/HPO_4^{2-}$ ), il nutriente viene traslocato velocemente all'interno della pianta in tutte le direzioni. Il contenuto di fosfato nelle cellule radicali e nel flusso xilematico è da cento a mille volte maggiore di quanto presente nella fase liquida del suolo.

Immediatamente coinvolto in processi metabolici ed incorporato, mediante la formazione di legami esteri, in composti organici quali esoso fosfati ed uridina difosfato.



Prodotto primario dell'assimilazione del P

# Assorbimento nutrizionale del fosfato

Il contenuto di P nei tessuti vegetali varia con le fasi fenologiche

( g kg<sup>-1</sup>)

Piante coltivate	Fase fenologica	Organi vegetali	Concentrazione sufficiente di P
Frumento ( <i>Triticum</i> spp.)	Accestimento	Lamine fogliari	3,5 - 4,9
Frumento ( <i>Triticum</i> spp.)	Fioritura	Lamine fogliari	2,5 - 3,4
Orzo ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	Accestimento	Foglie	5,0 - 6,8
Riso ( <i>Oryza sativa</i> L.) (*)	75 DAS (**)	Parti epigee	2,5 - 4,8
Riso ( <i>Oryza sativa</i> L.) (*)	Maturazione	Parti epigee	1,6 - 2,0
Mais ( <i>Zea mays</i> L.)	35-45 DAE (***)	Parti epigee	4,0 - 8,0
Mais ( <i>Zea mays</i> L.)	Emissione dell'infiorescenza maschile	Foglie	2,5 - 4,5
Mais ( <i>Zea mays</i> L.)	Emissione dell'infiorescenza femminile	Brattee	2,5 - 4,0
Sorgo ( <i>Sorghum vulgare</i> Pers.)	Germogliazione	Parti epigee	3,0 - 6,0
Sorgo ( <i>Sorghum vulgare</i> Pers.)	Inizio della fase vegetativa	Parti epigee	2,1 - 5,0
Sorgo ( <i>Sorghum vulgare</i> Pers.)	Antesi	3BBP (****)	1,5 - 2,5
Soia ( <i>Glycine max</i> L.)	Prima della formazione dei baccelli	Foglie più alte	2,6 - 5,0
Fagiolo ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Prima della fioritura	Foglie più alte	4,0 - 6,0
Fagiolo dall'occhio ( <i>Vigna unguicula</i> L.)	56 DAS	Parti epigee	3,0 - 3,5
Arachide ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)	Inizio dell'interramento dell'ovario	Parti epigee	2,0 - 3,5

(\*) coltivato in suolo sommerso

(\*\*) DAS = Days After Sowing = giorni dopo la semina

(\*\*\*) DAE = Days After Emergence = giorni dopo l'emergenza

(\*\*\*\*) 3BBP = Third Blade Below Panicle = terza foglia sotto il panicolo

Molto mobile all'interno della pianta viene facilmente e velocemente traslocato. Maggiori richieste fosfatiche si manifestano durante le prime fasi dello sviluppo (crescita radicale) e durante la formazione e maturazione degli organi riproduttivi.

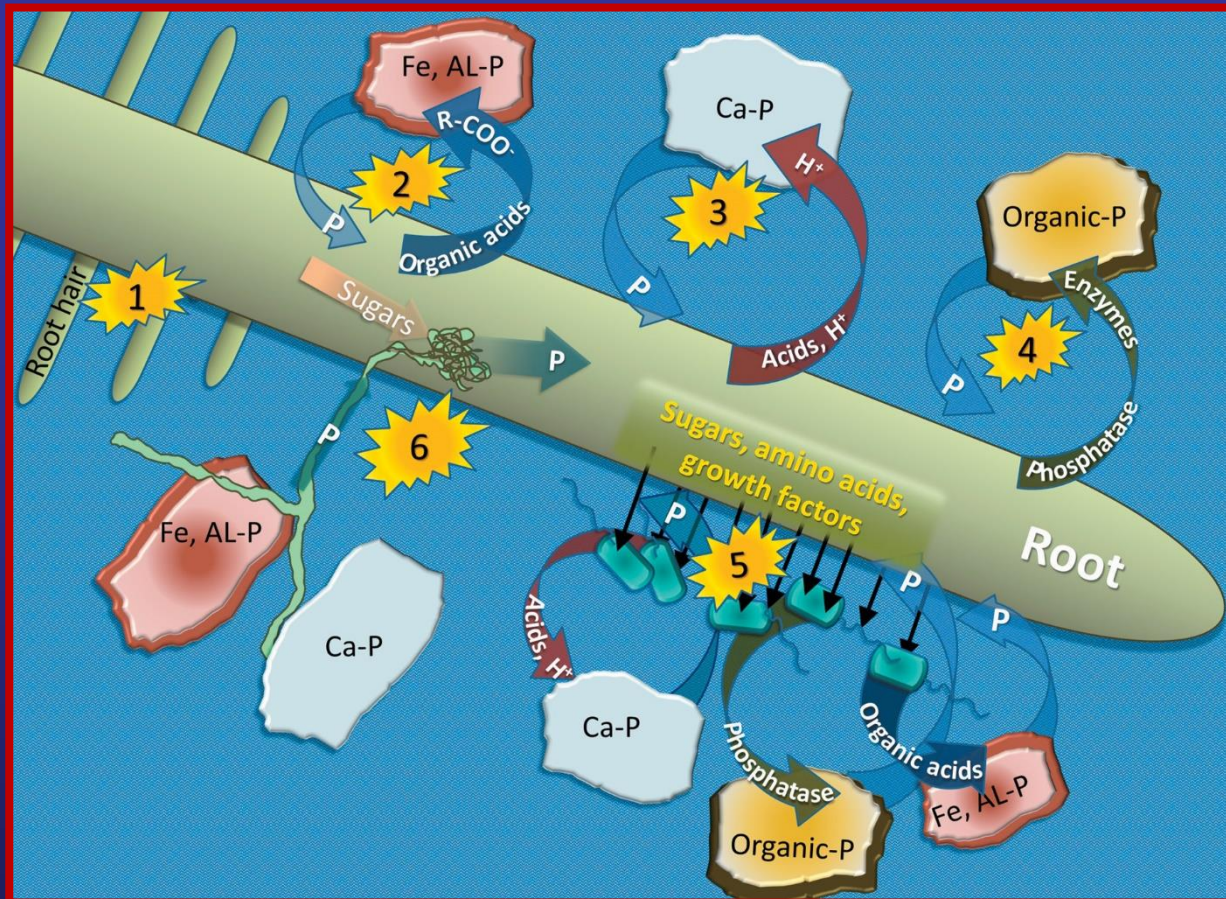
# Strategie di assorbimento nutrizionale del fosfato

La mobilità e la disponibilità del fosfato nel terreno è fortemente condizionata dal chimismo del suolo, dalla mineralogia e dalle caratteristiche costitutive dei colloidi del terreno, dal pH del sistema.

L'assorbimento radicale del fosfato è controllato da temperatura ed umidità del suolo, dalla specie e dal genotipo vegetale e dalla presenza di comunità rizosferiche.

Le piante devono necessariamente adottare strategie efficaci per assicurarsi l'approvvigionamento del nutriente dal suolo anche in condizioni pedochimiche sfavorevoli.

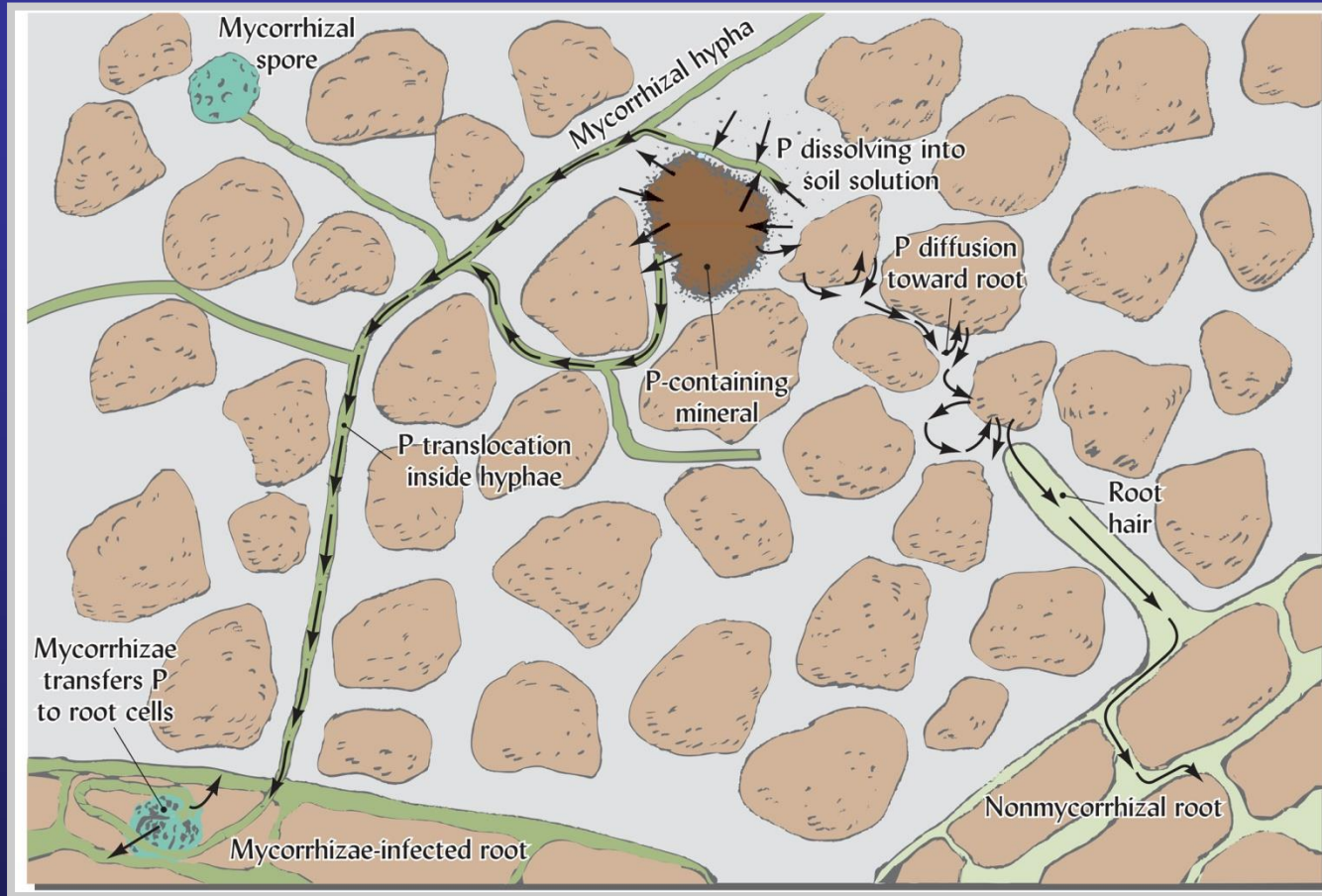
# Strategie di assorbimento nutrizionale del fosfato



(da Weil & Brady, 2017)

Six basic strategies that plant roots may employ to enhance their uptake of various forms of phosphorus from soils. (1) Increased root absorptive surface area. (2) Chelate iron or aluminum to release P. (3) Dissolve Ca-P compounds with acid exudates (4) Exude phosphatase enzymes to release P from organic compounds. (5) Exude substances to stimulate P-solubilizing rhizobacteria. (6) Encourage colonization by mycorrhizal fungi that help plants take up P. (Diagram courtesy of Ray R. Weil)

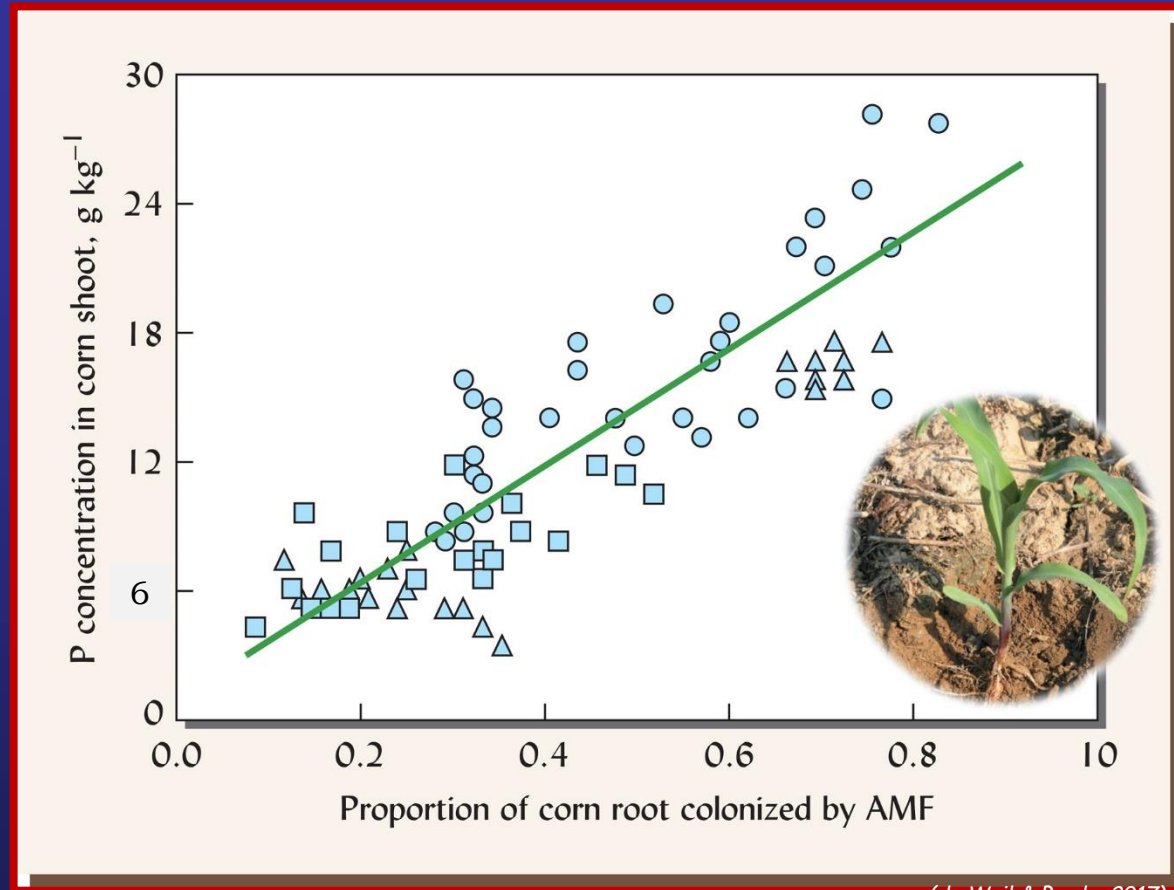
# Strategie di assorbimento nutrizionale del fosfato



(da Weil & Brady, 2017)

La simbiosi con funghi micorrizici espande il volume di suolo esplorato dalle radici della pianta e permette l'accesso a forme e comparti di fosforo altrimenti non disponibili.

# Strategie di assorbimento nutrizionale del fosfato



(da Weil & Brady, 2017)

Even on a soil with relatively high amounts of plant-available phosphorus, increased colonization by mycorrhizal fungi is associated with increased levels of P in young corn crop seedlings. Graph based on data from White and Weil (2009).

*Maggiore è la colonizzazione radicale in piantine di mais, maggiore è il contenuto di P nei tessuti vegetali.*

# Strategie di ottimizzazione della nutrizione fosfatica

- Correggere valori di pH estremi (range ottimale 6-7)
- Esaltare la simbiosi con le micorrize mediante:
  - consociazioni o avvicendamento con piante ospiti
  - inoculazione radicale
  - riduzione del disturbo meccanico
- Introdurre varietà P-efficienti
- Introdurre *cover crop* P-efficienti
- Aggiungere matrici organiche
- Dosare accuratamente la quantità di  $P_{inorg}$  distribuito
- Effettuare la distribuzione localizzata
- Combinare la distribuzione di P con  $N-NH_4^+$  per sfruttare l'acidificazione della rizosfera

# Effetti della carenza e dell'eccesso di fosforo

## Piante P-carenti manifestano:

- ✓ bordo fogliare rossastro
- ✓ filloptosi
- ✓ apparato radicale ridotto
- ✓ crescita stentata
- ✓ ridotto numero, dimensione e germinabilità dei semi



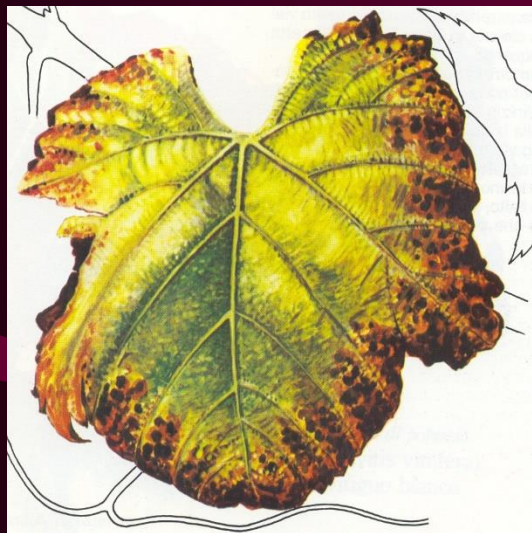
## Piante con P-surplus presentano:

- ✓ sbilanciamento nutrizionale
- ✓ carenza indotta di Zn



# ATLANTE FOSFORO

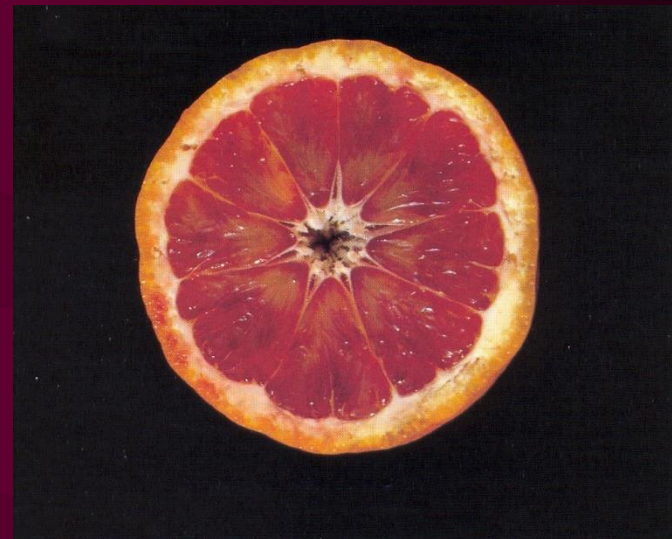
Vite



agrumi



agrumi



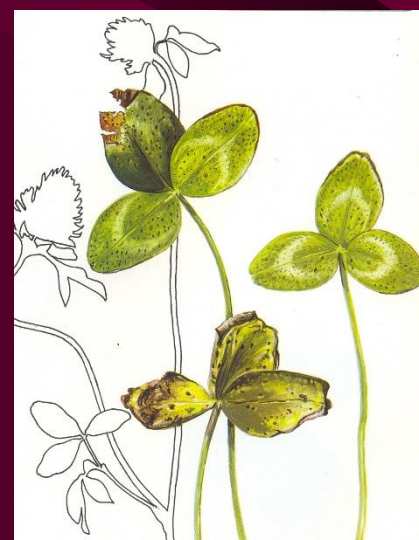
Mais



riso



trifoglio



- ✓ Il P è presente nei sistemi biologici sempre come fosfato ed ha un ciclo biogeochimico sedimentario
- ✓ Il contenuto totale di P nel suolo è generalmente basso e molto variabile: da 200 a 2000 mg kg<sup>-1</sup> secondo il tipo di suolo
- ✓ La maggior parte del P è presente nel suolo in forme inorganiche (composti del Ca, Al, Fe), ed organiche (inositol fosfati, fosfolipidi, acidi nucleici) pochissimo o affatto solubili
- ✓ Pochissimo mobile nel terreno, il fosfato è trattenuto dal potere assorbente del suolo e reso poco mobile dal chimismo del sistema
- ✓ Le piante adottano diverse strategie per assorbire il P disciolto nella fase liquida del suolo (pool solubile o disponibile) come ioni fosfato monobasico (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) o bibasico (HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), le quali rappresentano solo una frazione modesta del P totale
- ✓ Molto mobile all'interno della pianta, è facilmente traslocato
- ✓ Interazioni positive con N, K e Mg, negative con Zn
- ✓ Carezza di P causa crescita stentata, limitato sviluppo dell'apparato radicale, riduzione quali-quantitativa della produzione
- ✓ Eccesso di P causa antagonismi nutrizionali

# Soil P balance

$$Q_P = \frac{F_P - (P_m + P_{CP})}{P_{ds}}$$

$Q_P$ : Quantità di P efficiente da distribuire

$F_P$ : Fabbisogno totale di P della coltura

$P_m$ : P apportato per mineralizzazione della SOM

$P_{CP}$ : P derivante (o sottratto) dalla decomposizione dei residui della coltura precedente

$P_{ds}$ : quota del P somministrato con la concimazione realmente disponibile nel suolo per la pianta a seguito dei processi di precipitazione e fissazione

# F<sub>P</sub>: Fabbisogno totale di P della coltura

**TABELLA 9.1** Quantità di biomassa secca della produzione utile e dei residui aerei, harvest index e concentrazione di N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O della produzione utile e dei residui aerei delle principali colture erbacee e ortive

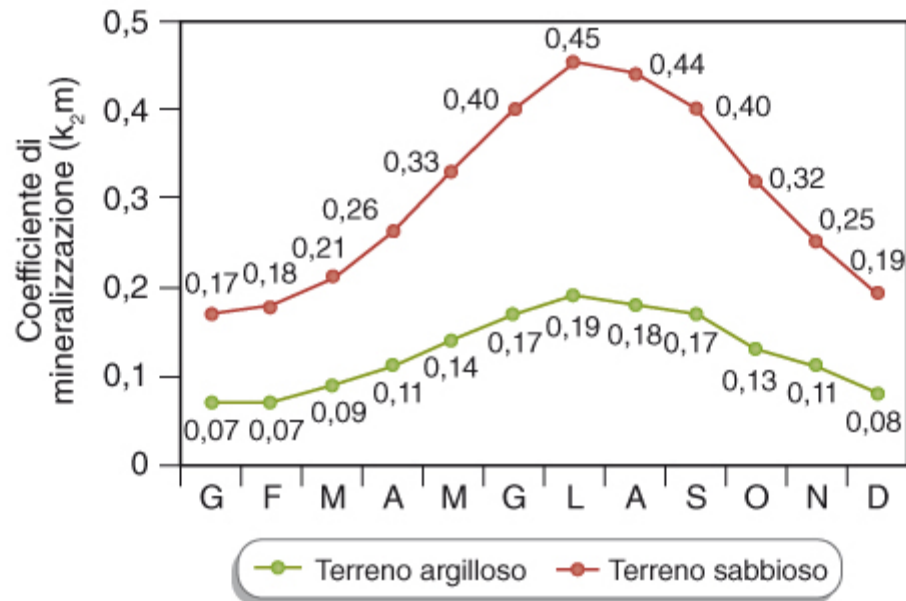
Coltura	Produzione utile				Harvest index	Residui aerei			
	t ha <sup>-1</sup> di s.s.	N (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)		t ha <sup>-1</sup> di s.s.	N (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)
Aglio	2,0-4,0	2,6	1,0	1,6	0,75	0,7-1,3	3,3	0,8	5,4
Anguria	5,0-7,0	1,0	0,8	1,7	0,85	0,9-1,2	3,3	1,3	4,2
Asparago	0,5-1,0	5,5	1,8	3,4	0,25	1,5-3,0	3,1	0,9	2,4
Avena da granella	3,0-5,0	2,1	0,9	1,3	0,40	4,5-7,5	0,5	0,3	1,2
Barbabietola	8,8-11,0	1,2	0,5	2,0	0,80	2,2-2,8	2,4	1,0	3,0
Carciofo rifiorante	2,4-3,6	2,6	1,2	2,3	0,42	3,3-5,0	3,6	0,5	3,6
Carota	2,4-3,6	1,8	0,9	3,0	0,85	0,4-0,6	3,6	1,0	4,5
Cavolfiore	6,0-8,0	4,0	1,2	4,4	0,98	0,1-0,2	4,4	2,1	4,4
Cavolo Broccolo	4,0-6,0	4,0	1,2	4,4	0,98	0,1	4,4	2,1	4,4
Cavolo verza	2,0-3,0	3,3	0,8	3,7	0,98	0,0-0,1	4,7	2,2	4,7
Cece	2,0-3,0	3,5	0,9	1,2	0,33	4,1-6,1	1,2	0,3	1,7
Cetriolo	3,0-5,0	2,2	1,2	3,7	0,80	0,8-1,3	4,4	1,6	4,9
Cipolla	3,6-4,8	2,8	1,6	2,2	0,80	0,9-1,2	4,7	0,8	4,7
Colza granella	2,0-4,0	4,2	2,0	2,4	0,33	4,1-8,1	2,0	1,3	2,5
Erba medica (fieno)	10,0-15,0	2,8	0,6	2,0	1,00				
Erbai graminacee (fieno)	5,0-10,0	2,4	0,9	3,1	1,00				
Fagiolino fresco	1,0-1,2	2,4	0,9	2,4	0,45	1,2-1,5	1,5	0,5	1,5
Fagiolo secco	2,0-3,0	2,4	1,0	2,7	0,75	0,7-1,0	1,5	0,5	1,5
Favino	2,0-4,0	4,8	1,6	2,3	0,40	3,0-6,0	1,6	0,6	1,4
Finocchio	1,8-2,7	2,8	1,2	3,5	0,80	0,5-0,7	2,8	1,2	3,5
Fragola	3,5-4,5	1,3	0,7	2,5	0,40	5,3-6,8	4,2	1,5	6,0
Fruento duro	3,0-6,0	2,5	1,1	1,3	0,40	4,5-9,0	0,5	0,2	1,1
Fruento tenero	4,0-8,0	2,3	1,0	1,2	0,40	6,0-12,0	0,5	0,2	1,0
Girasole	3,0-6,0	3,3	1,6	1,8	0,40	4,5-9,0	1,0	0,6	3,3
Indivia	1,4-2,1	3,0	1,0	6,0	0,98				
Lattuga	1,2-1,8	3,8	1,1	6,3	0,98				
Loiessa-fieno	7,0-15,0	1,5	0,3	1,0	1,00				
Mais granella	8,0-12,0	1,7	0,8	0,7	0,50	8,0-12,0	0,7	0,3	1,4
Mais trinciato	17,0-28,0	1,3	0,6	1,2	1,00	0,0			
Melanzana	2,4-4,0	2,5	1,0	3,6	0,50	2,4-4,0	4,2	0,9	4,6
Melone	4,0-6,0	1,5	0,8	3,8	0,60	2,7-4,0	5,0	1,8	5,0
Orzo granella	3,0-5,0	2,4	1,1	1,3	0,40	4,5-7,5	0,6	0,4	1,2
Orzo insilato	4,0-6,0	1,2	0,6	1,2	1,00				
Patata	6,9-11,5	1,6	0,6	3,2	0,80	1,7-2,9	4,0	0,7	5,0
Pomodoro da industria	3,6-6,0	2,8	1,1	5,6	0,70	1,5-2,6	4,0	0,9	5,0
Riso	5,0-7,0	1,4	0,8	0,6	0,46	5,9-8,2	0,7	0,4	2,4
Soia	2,0-4,0	6,6	1,7	2,7	0,40	3,0-6,0	1,9	0,6	1,8
Sorgo trinciato	7,0-9,0	1,6	0,5	1,1	1,00				
Spinacio fresco	1,8-2,3	4,5	1,2	6,4	0,90	0,2-0,3	4,5	1,2	6,4
Tabacco Burley	3,0-6,0	2,6	1,1	3,2	0,65	1,6-3,2	2,0	1,1	3,3
Triticale	5,0-8,0	1,9	1,0	0,8	0,45	6,1-9,8	0,4	0,2	1,5
Zucca	3,6-4,8	3,9	1,6	5,5	0,60	2,4-3,2	3,2	1,5	4,6
Zucchini	1,2-1,8	3,9	1,6	5,5	0,60	0,8-1,2	3,2	1,5	4,6

# $P_m$ : P apportato per mineralizzazione della SOM

$$P_m = S \cdot h \cdot \rho_{app} \cdot [P_{Org}] \cdot k_2$$

$$P_m = S \cdot h \cdot \rho_{app} \cdot [P_{Org}] \cdot \sum(k_2 \text{ mensili})$$

$$k_{2\text{mensile}} = \frac{(T_{\text{mensile}} - 0.5) \cdot 240}{[(A + 20) \cdot (0.3 \cdot L + 20)]} \cdot 0.5$$



**FIGURA 9.2** Valori dei coefficienti mensili di mineralizzazione della sostanza organica del suolo.

$P_{CP}$ : P derivante dalla decomposizione dei residui della coltura precedente

$$P_{CP} = \left( Q_{RSS} \cdot P_{SS} - Q_{RSS} \cdot k_1 \cdot P_{Humus} \right) \cdot \frac{n}{12}$$

$Q_{RSS}$ : Quantità di residui colturali interrati

$P_{SS}$ : titolo di P nei residui colturali

$k_1$ : coefficiente isoumico

$P_{Humus}$ : titolo di P nell'humus (circa 0.5%)

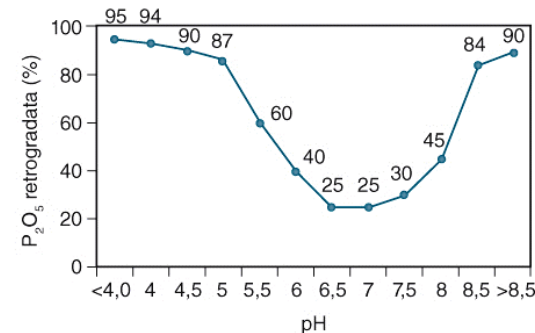
$n$ : numero di mesi tra l'interramento dei residui colturali e la raccolta della coltura da concimare

**NB: rilascio di P minerale quando C/P del residuo interrato < 200.**

# $P_{ds}$ : quota di P disponibile per la pianta rispetto a quella somministrata

Lo svolgersi nel suolo di processi di adsorbimento, fissazione e precipitazione indotti dal pH del suolo e dai componenti minerali della fase solida a carico delle forme fosfatiche solubili determinano la **retrogradazione del fosforo**. In sostanza, la quota di P realmente disponibile nel suolo ( $P_{ds}$ ) dopo la concimazione sarà:

$$P_{ds} = 1 - \frac{P_{RE}}{100}$$



**FIGURA 9.3** Valori della quantità di  $P_2O_5$  retrogradata ( $P_{RE}$ ) espressi in % della quantità distribuita in dipendenza del pH del terreno.