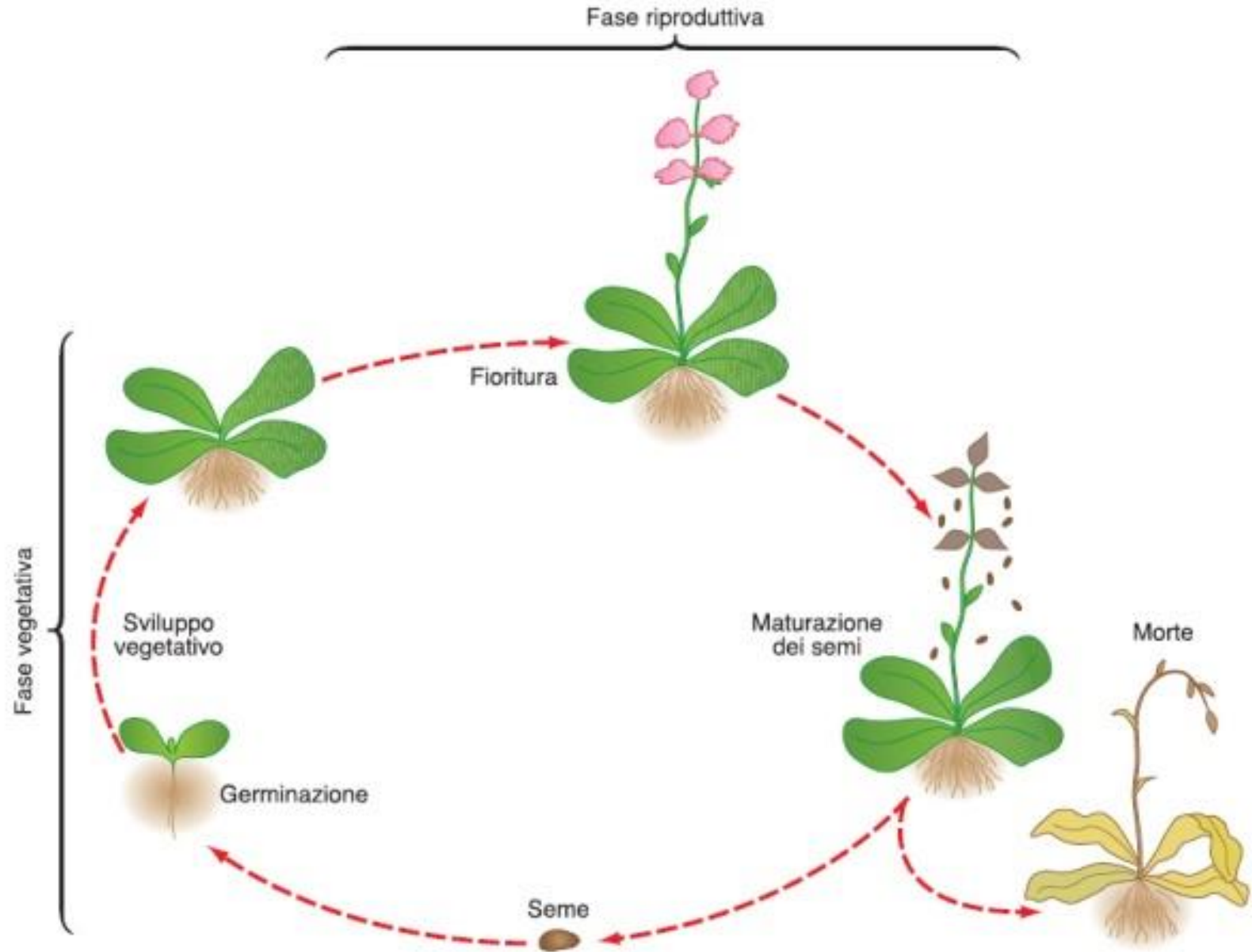


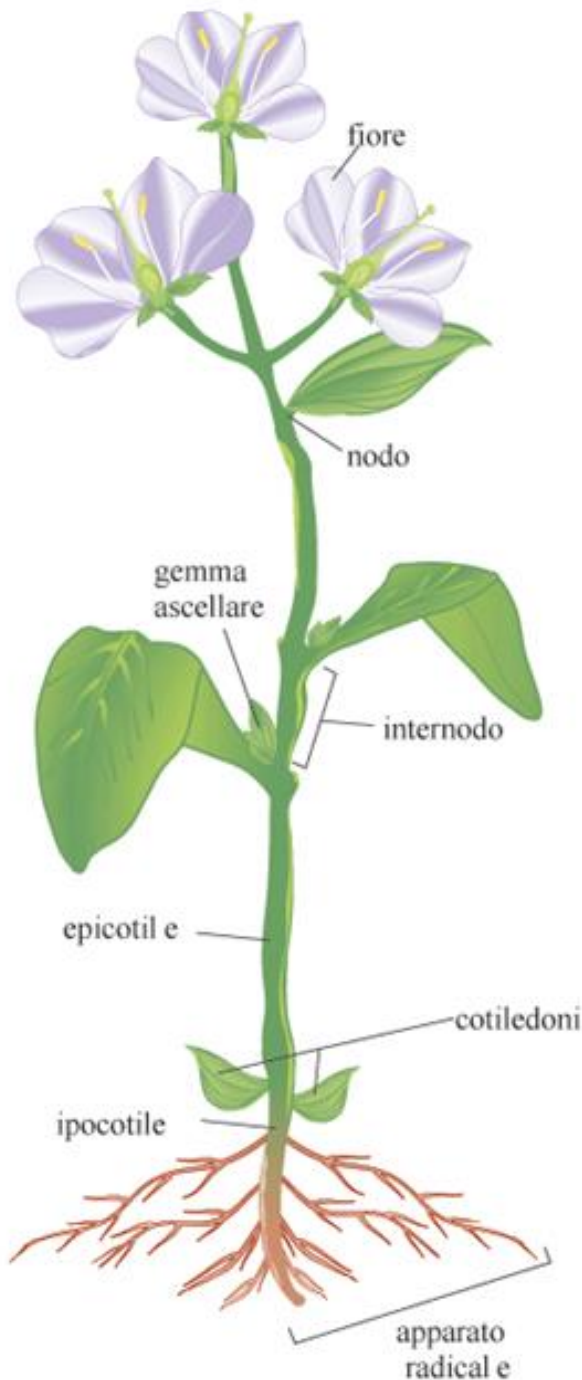


Il seme e la germinazione

Ciclo vitale di un angiosperma annuale



Organografia di un angiosperma dicotiledone

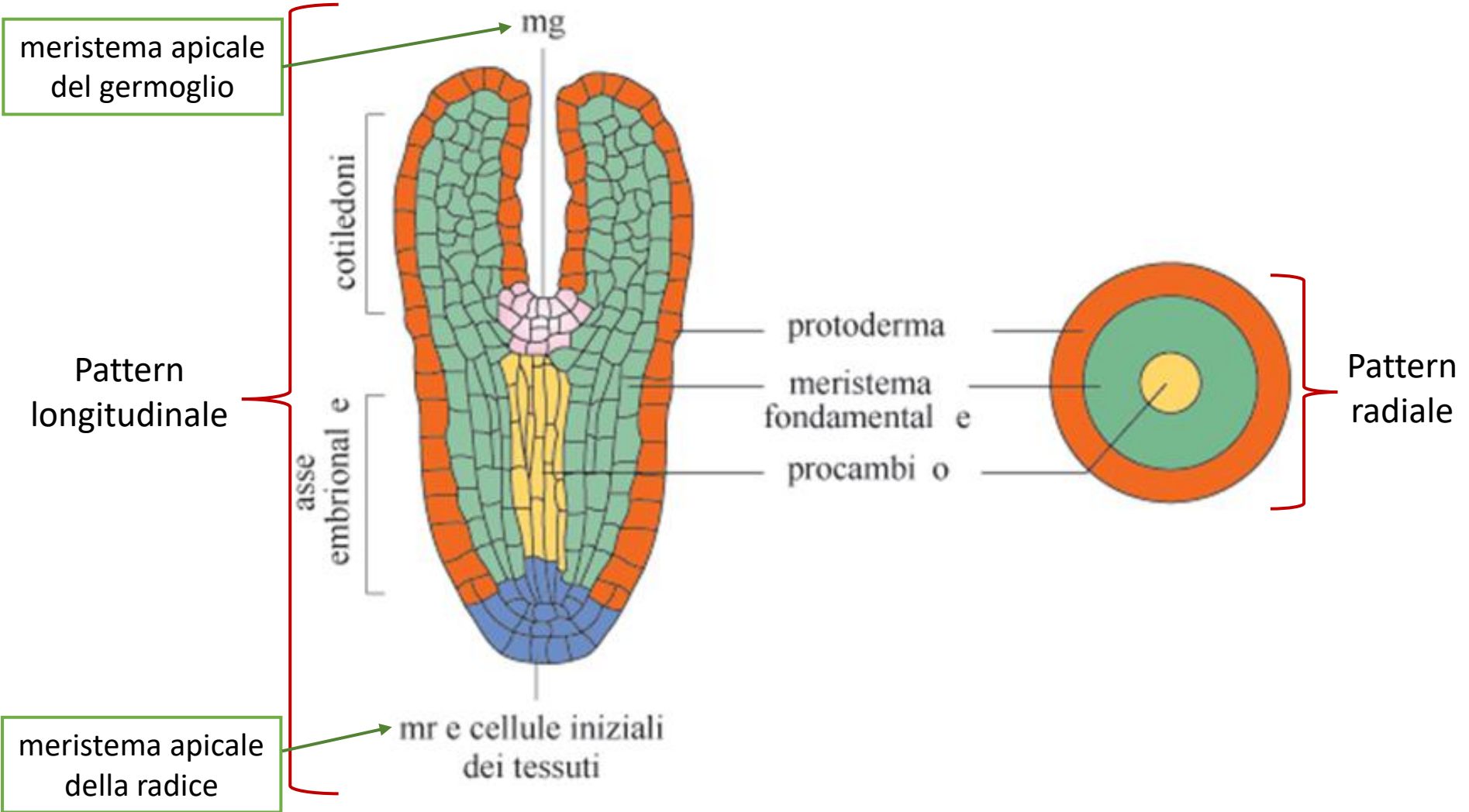


Origine delle parti fondamentali dello sporofito:

- *Cotiledoni*: durante l'embriogenesi dei meristemi primari
- *Epicotile, Ipocotile*: subito dopo la germinazione
- *Fusto, Foglie, Gemme ascellari, Radici*: durante la crescita vegetativa
- *Infiorescenza/Fiore*: dopo la transizione a fiore

Embriogenesi

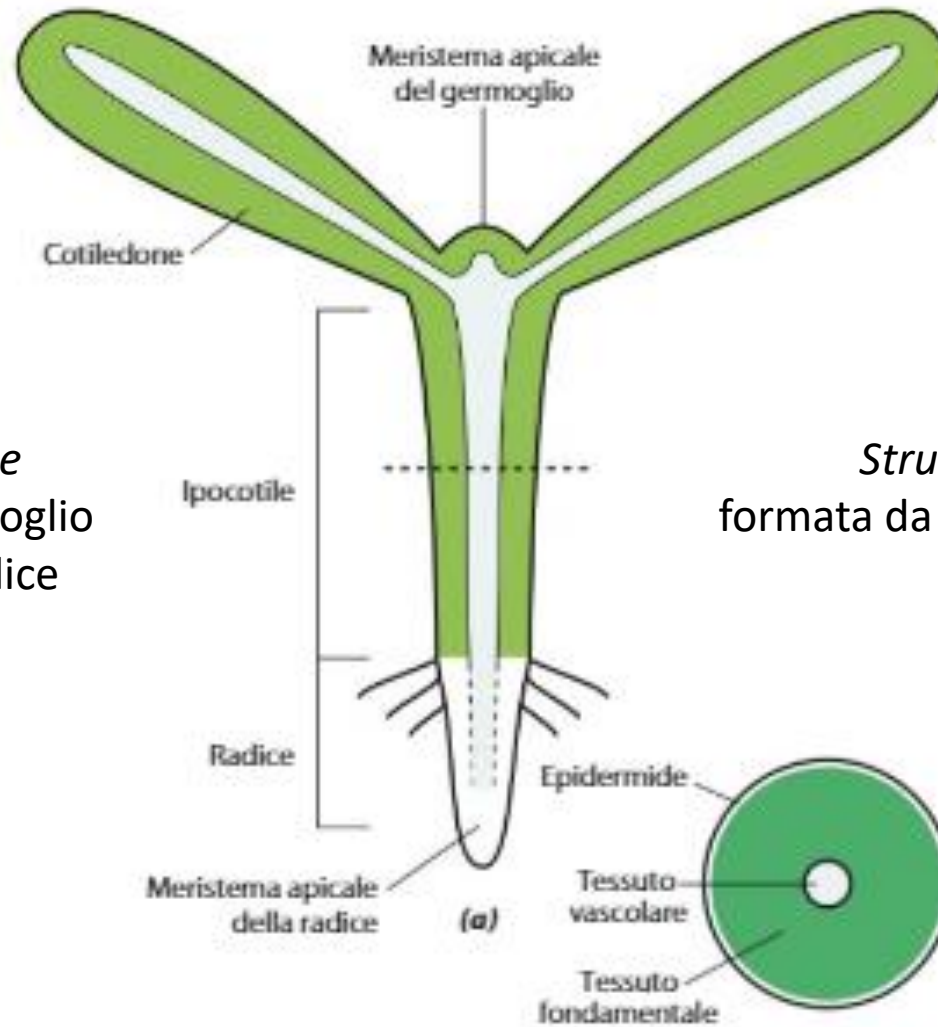
formazione dell'embrione e prima fase dello sviluppo del seme



Organizzazione apice-base:
lungo l'asse maggiore della pianta

Sistemi di tessuti organizzati
concentricamente

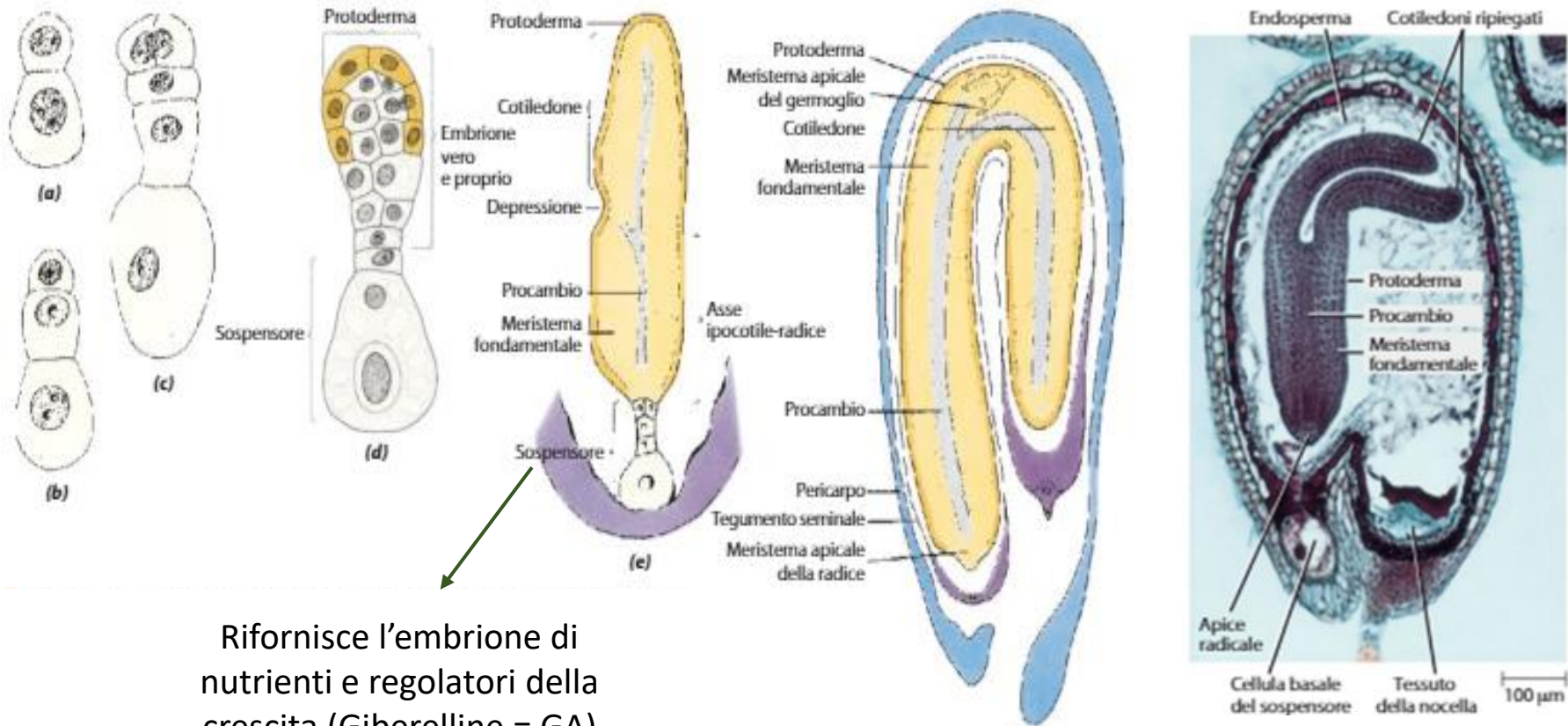
Plantula



asse embrionale
dall'apice del germoglio
all'apice della radice

Struttura radiale:
formata da tre sistemi di tessuti

Formazione dell'embrione stadi precoci identici in tutte le angiosperme



Rifornisce l'embrione di nutrienti e regolatori della crescita (Giberelline = GA)

monocotiledone

dicotiledone

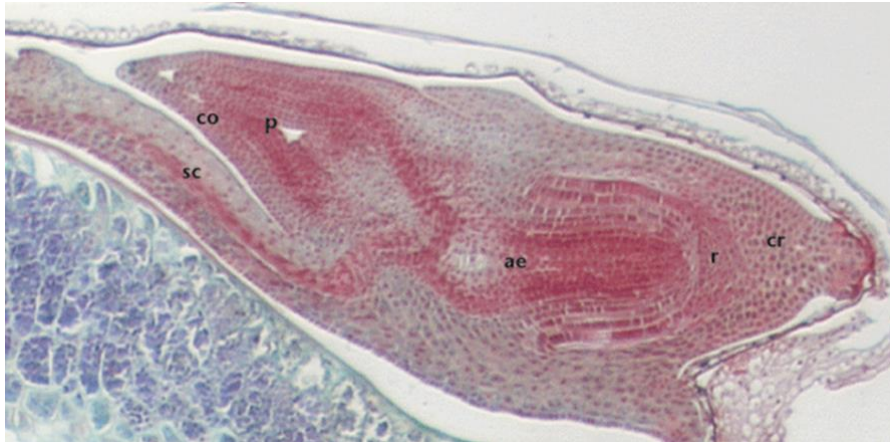
Divisione dello ZIGOTE



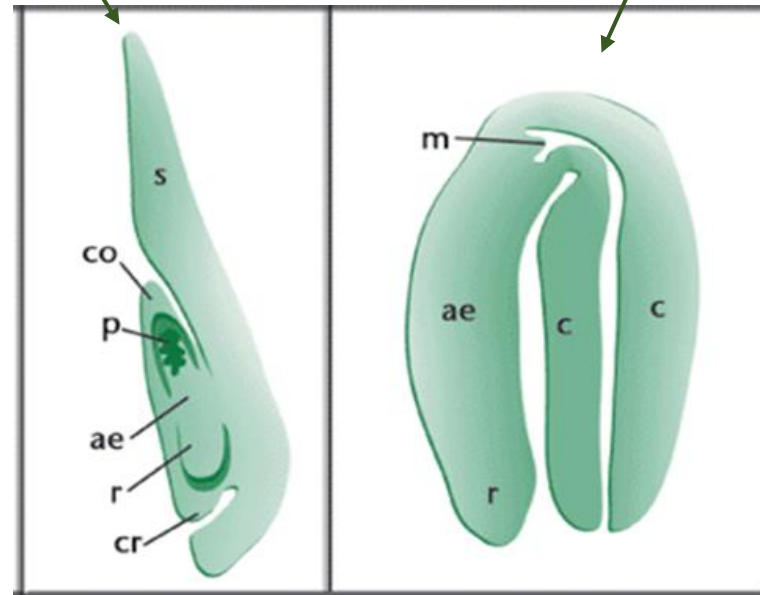
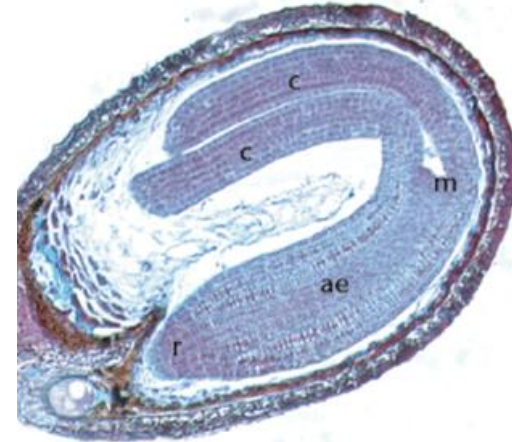
POLARITA'

polo superiore calazale: embrione maturo
polo inferiore micropilare: sospensore

MONOCOTILEDONI



DICOTILEDONI

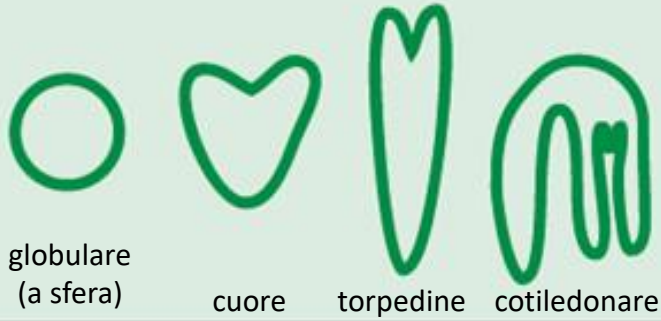


r: apice radicale protetto dalla coleorizza (**cr**)
ae: asse embrionale (ipocotile)
p: apice del germoglio (piumetta) con bozze fogliari
co: coleotile protegge l'apice (p)
s: scutello (cotiledone carnoso e massiccio)

L'apice radicale (**r**) continua con l'asse embrionale (**ae**) che termina con il meristema del germoglio (**m**) posto tra due cotiledoni (**c**)

Stadi morfologici di sviluppo dell'embrione

dicotiledoni



monocotiledoni

a

globulare
(a sfera)

cuore

torpedine

cotiledonare

b

1

2

3

clava

4

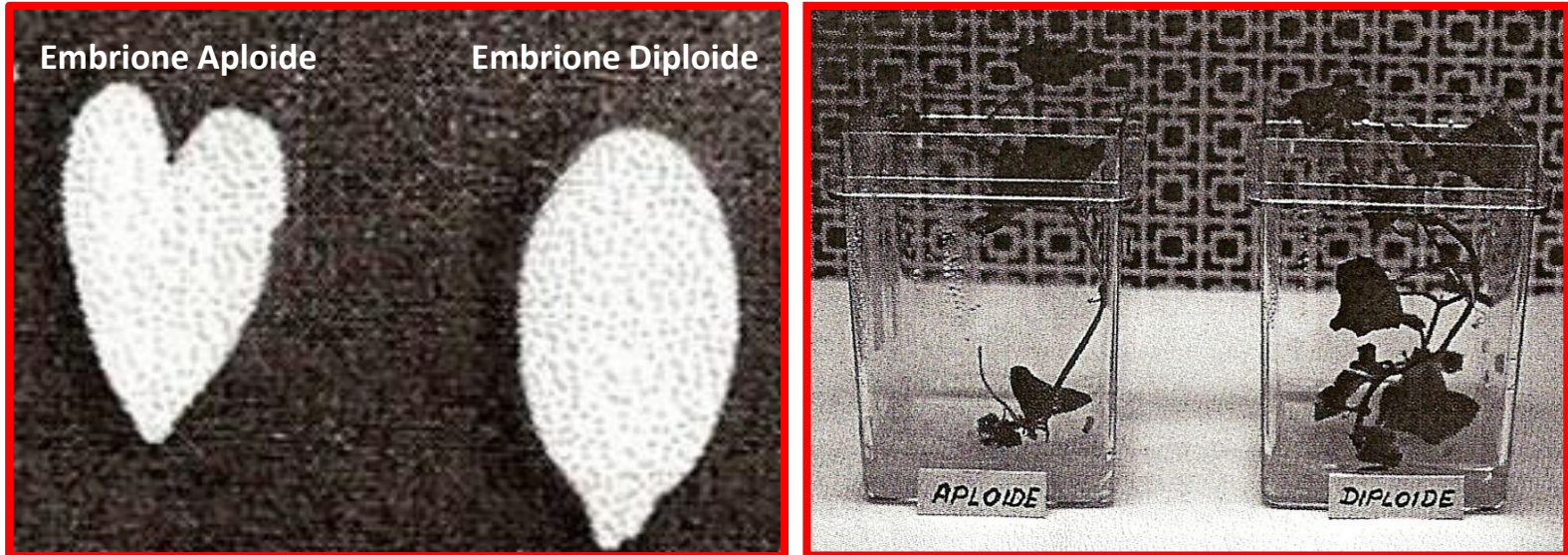
5

6

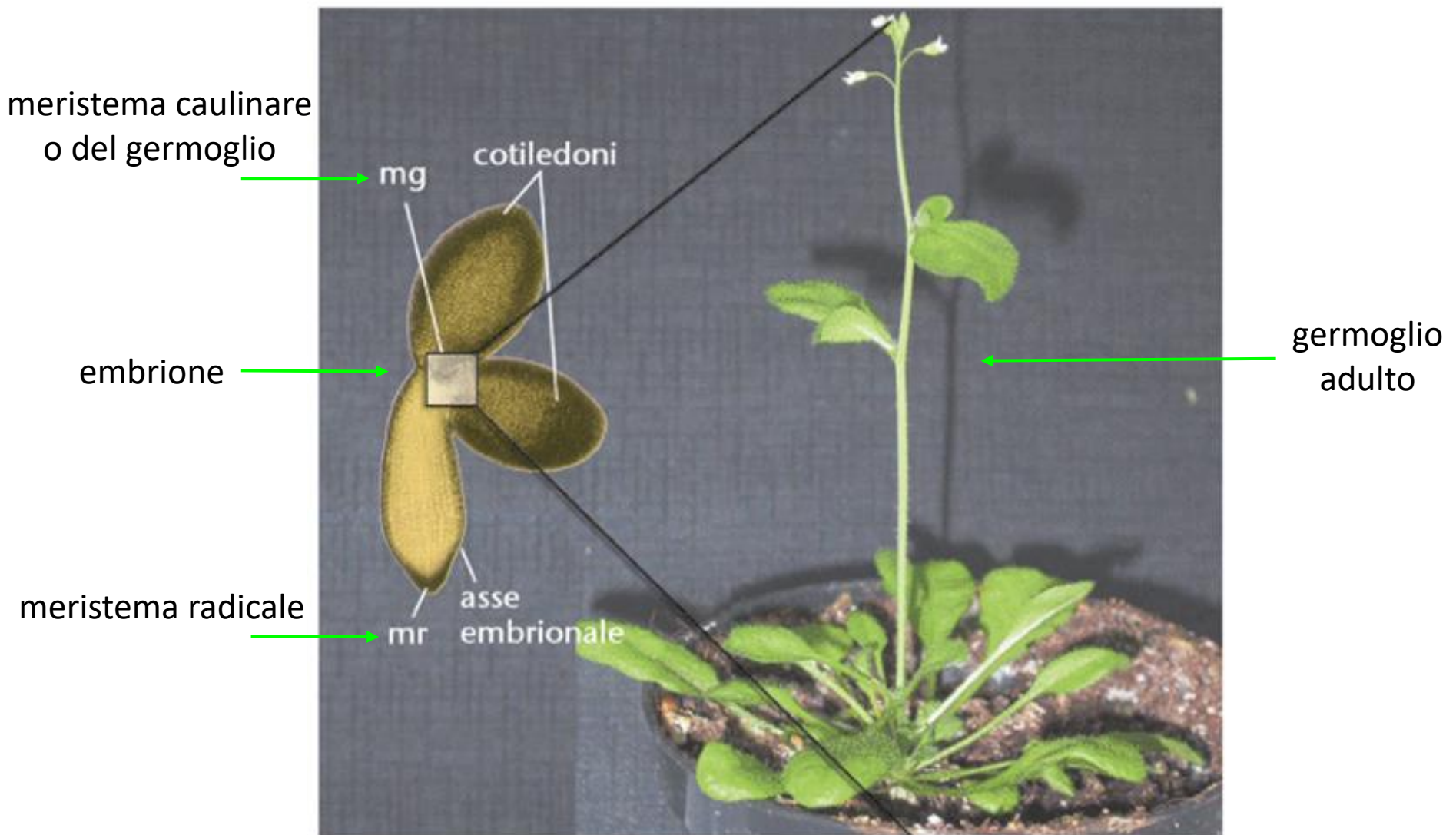
7

L'asse embrionale (ipocotile) è generato lateralmente nell'embrione:
il meristema apicale del germoglio si origina su un fianco del cotiledone

Ottenimento di piante di melone via Partenogenesi in situ
impiego di polline irraggiato con raggi γ



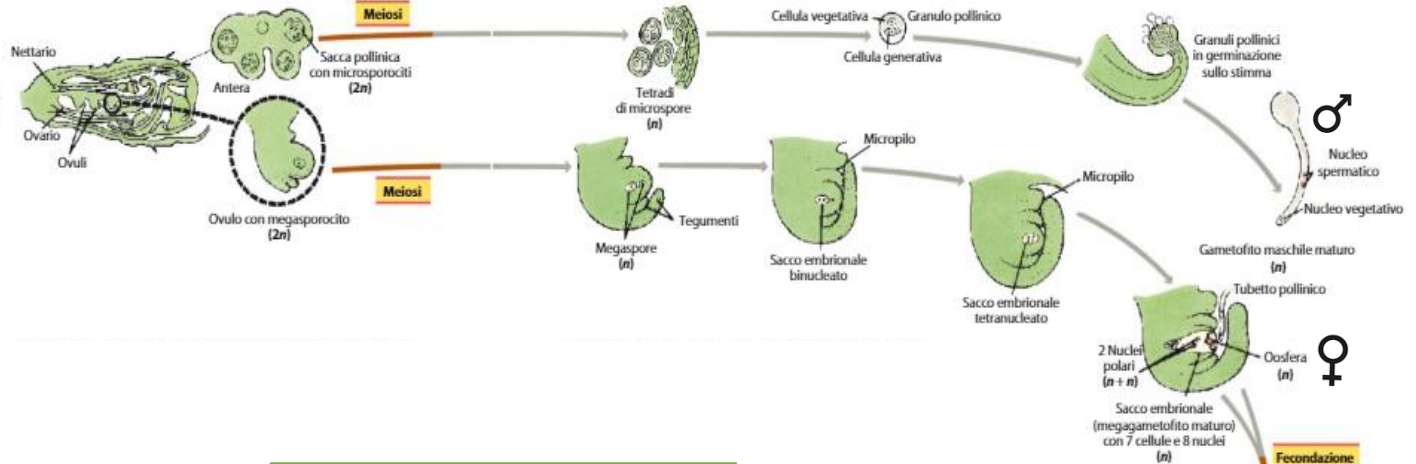
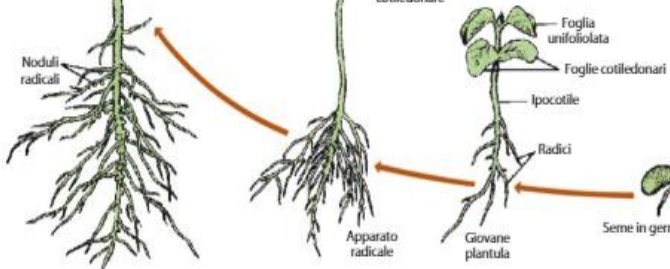
Ficcadenti *et al.* , 1995. Journal Genetics and Breeding. 49: 359-364
Ficcadenti *et al.*, 2002. Plant Disease 86(8):897-900



Il meristema caulinare è tra i due cotiledoni e darà origine alla maggior parte degli organi del germoglio adulto

Ciclo riproduttivo angiosperma

Sporofito maturo



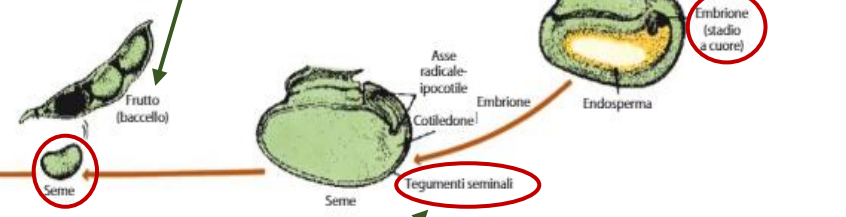
OVULO → SEME
 OVARIO → FRUTTO

Endosperma

Embrione

Pareti dell'ovario (pericarpo)

Tegumenti dell'ovulo

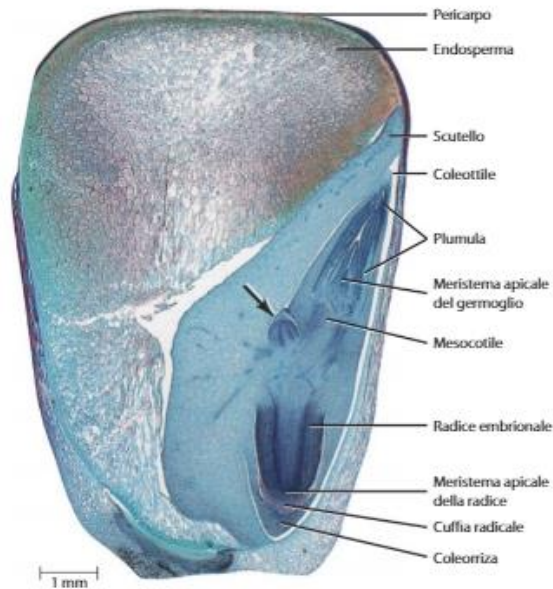


Seme contiene l'embrione maturo



Vantaggio selettivo

- Assicura il superamento delle condizioni ambientali sfavorevoli
- Assicura la diffusione della specie



La biologia delle piante
di Franco
ZANICHELLI

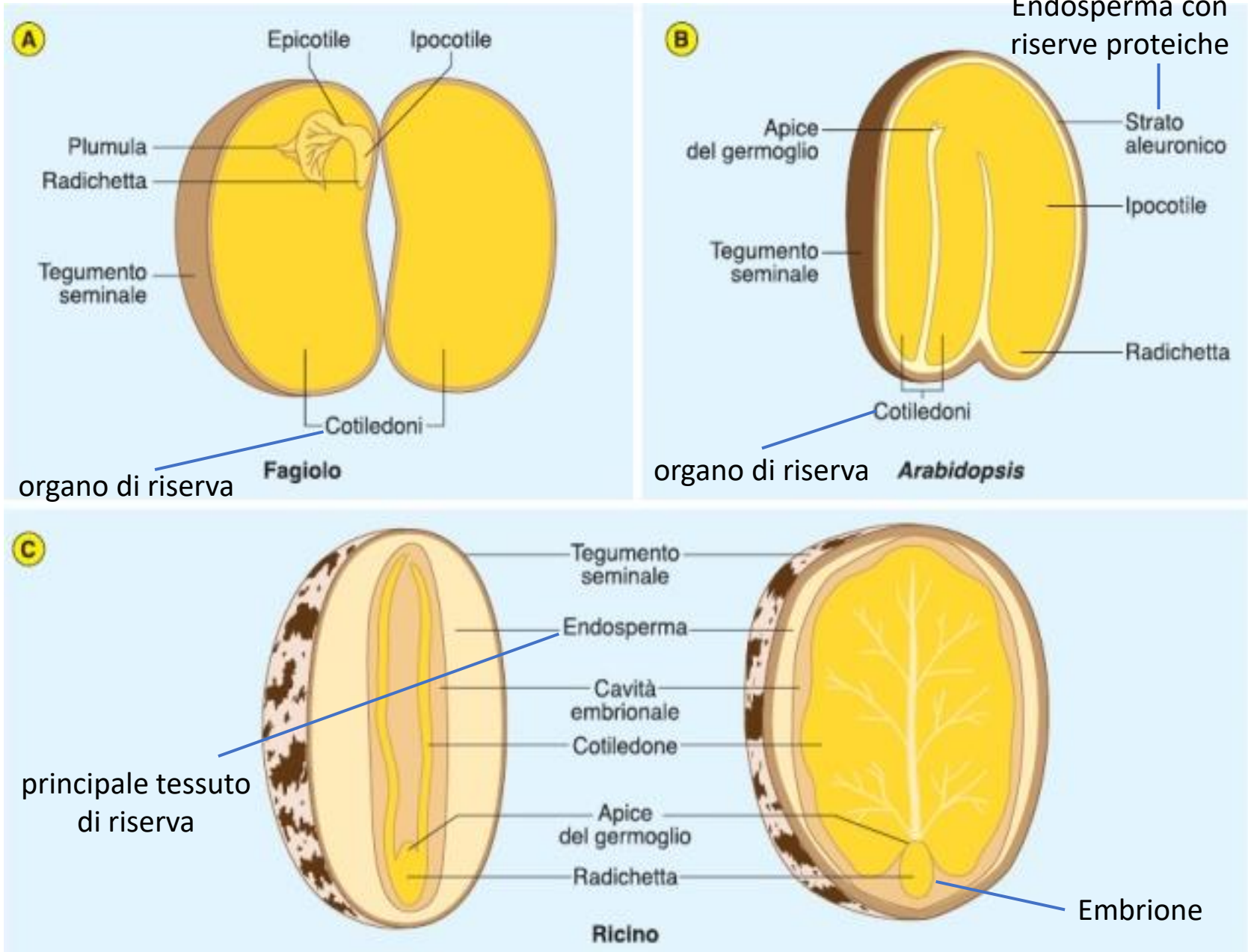
COMPONENTI PRINCIPALI DEL SEME

Embrione ($2n$): deriva dallo zigote (fecondazione)

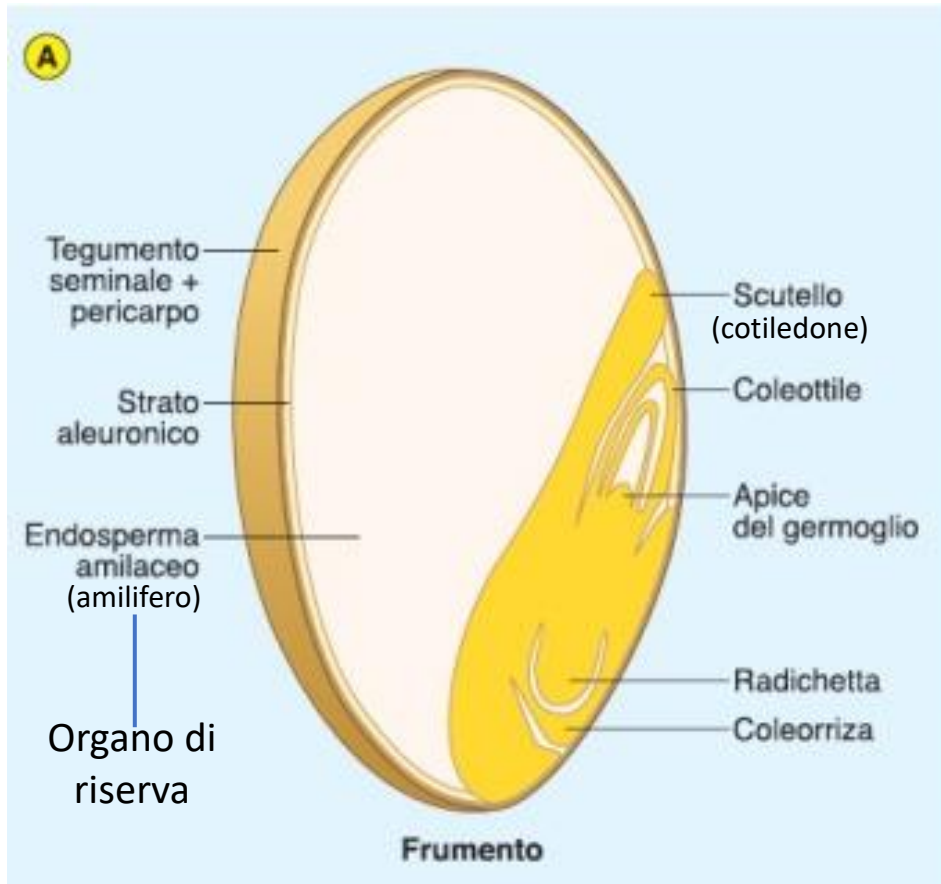
Endosperma ($3n$ nelle angiosperme; doppia fecondazione): è un tessuto di riserva (amido, proteine di riserva, oli) per l'embrione in via di sviluppo e per il seme in germinazione

Tegumento seminale (episperma) ($2n$): deriva dalle pareti dell'ovulo (gametofito femminile)

Localizzazione delle riserve nelle dicotiledoni

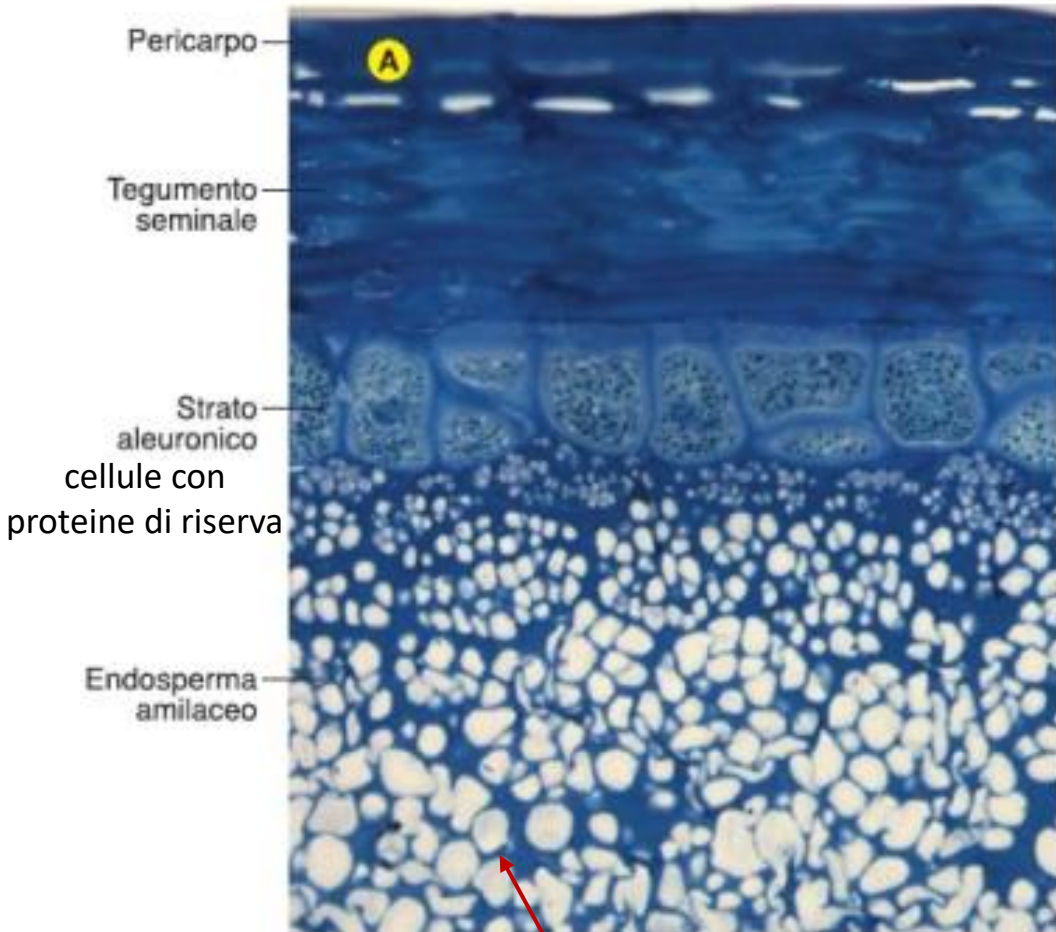


Localizzazione delle riserve nelle monocotiledoni



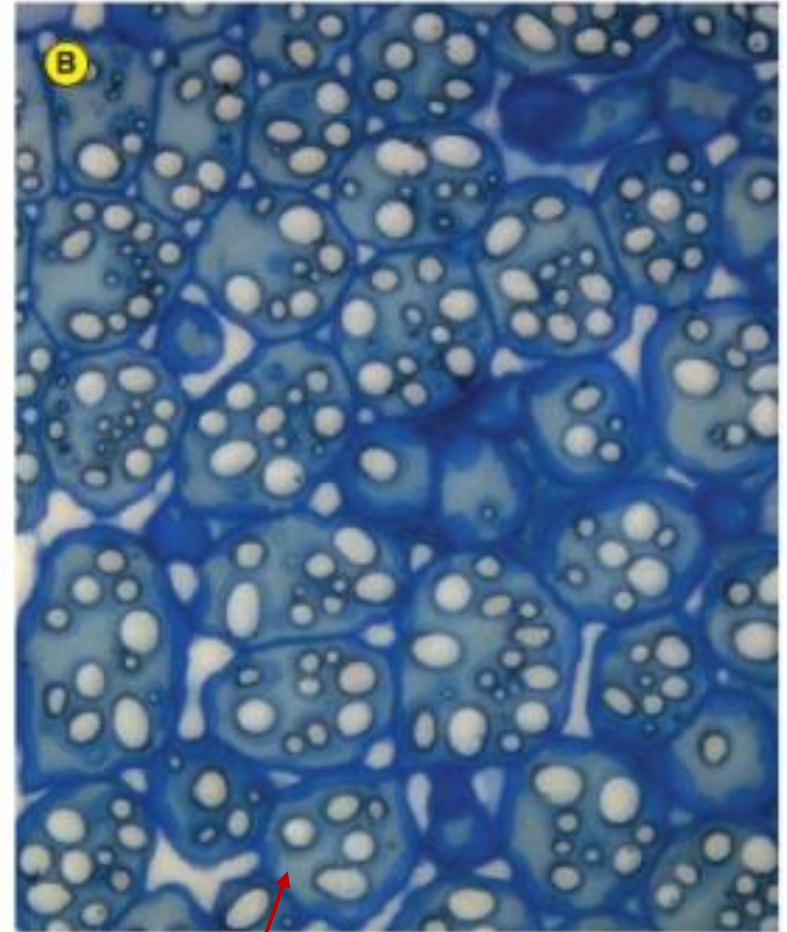
Nella maggior parte delle monocotiledoni le riserve si trovano nell'endosperma

Mais (*Zea mays*)



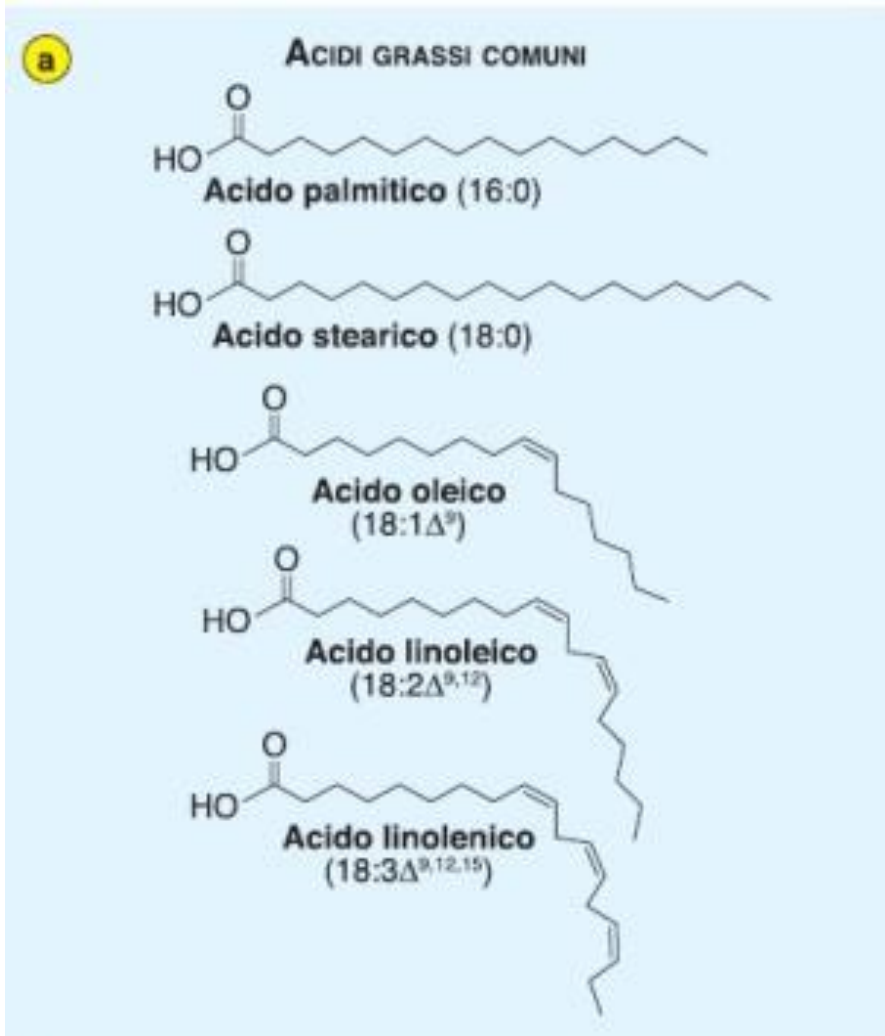
Cellule morte riempite di granuli di amido (non colorati)

Fagiolo (*Phaseolus vulgaris*)

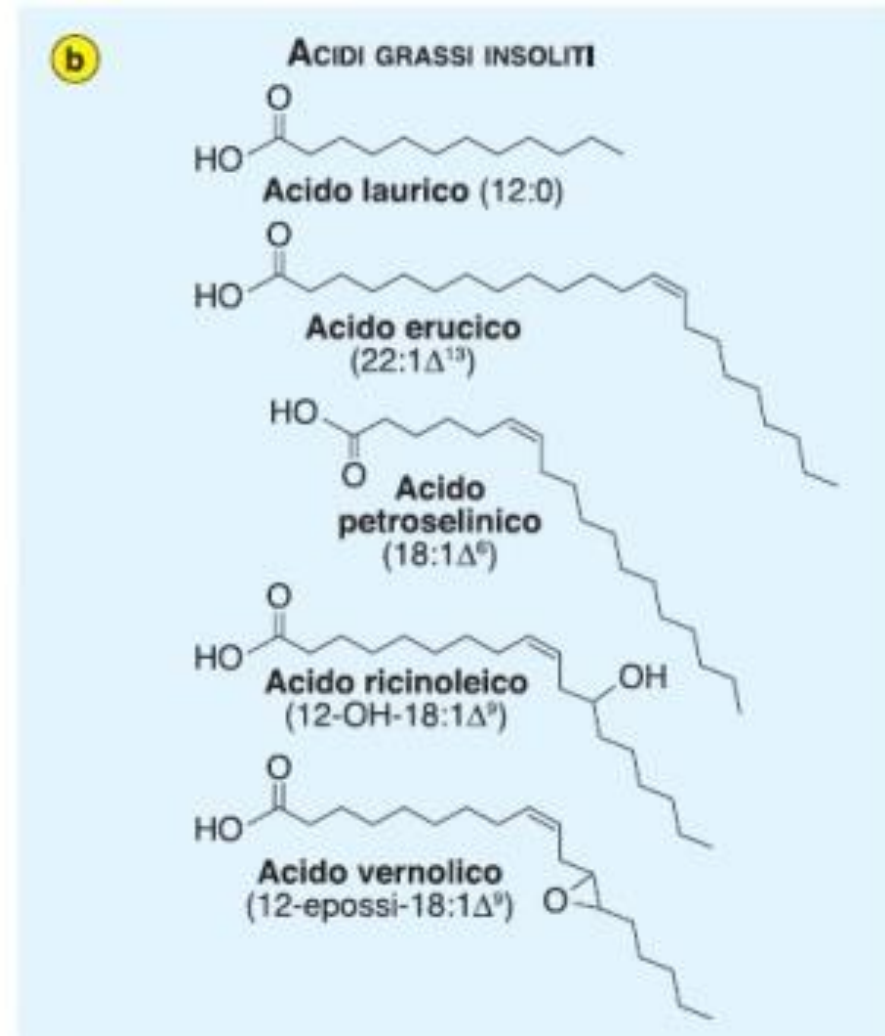


Cellule vive contenenti molti amiloplasti con grossi granuli di amido (non colorati)

Le principali sostanze nutritive accumulate nei semi sono carboidrati, proteine e lipidi



Presenti comunemente nei trigliceroli di riserva dei semi



Sintetizzati solo nei semi di certe piante

Composizione media percentuale delle riserve e loro localizzazione in alcune specie di interesse agronomico

	Proteine	Lipidi	Carboidrati	Principale organo di riserva
Cereali				
Mais	10	5	80	Endosperma
Frumento	12	2	75	Endosperma
Avena	13	8	66	Endosperma
Legumi				
Soya	37	22	12	Cotiledoni
Arachide	31	48	12	Cotiledoni
Pisello	25	6	52	Cotiledoni
Specie oleaginose				
Ricino	18	64	Tracce	Endosperma
Palma da olio	9	49	28	Endosperma
Colza	21	48	19	Cotiledoni

Maturazione del seme *seconda fase dello sviluppo del seme*

Sintesi di sostanze di riserva : amido, proteine di riserva e oli (endosperma e/o cotiledoni)

Indurimento del tegumento seminale: protezione dell'embrione e delle riserve nutritive

Disseccamento: perdita di acqua (> 90%) con conseguente riduzione del metabolismo all'interno del seme



QUIESCENZA e DORMIENZA

arresto della crescita e del metabolismo per superare le condizioni ambientali non favorevoli

QUIESCENZA: in condizioni ambientali favorevoli (reidratazione) i semi germinano

DORMIENZA

Tegumento seminale: impermeabilità all'acqua e all'ossigeno, rigidità, inibitori della crescita (es. conifere, molti cereali e nelle dicotiledoni)

Embrione: immaturità fisiologica, rapporto tra giberelline (stimola la germinazione) e acido abscissico (promuove la dormienza), (es. rosaceae, piante legnose e alcune graminacee)



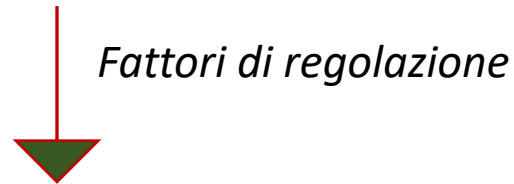
Post-maturazione: cambiamenti enzimatici e biochimici necessari prima di poter germinare (seme è vitale), innescati dalle basse temperature (vernalizzazione)

Dormienza primaria: acquisita durante la maturazione del seme

Dormienza secondaria: indotta da condizioni non favorevole alla germinazione

Fattori essenziali per la germinazione dei semi

- *ACQUA*: necessaria per la digestione e utilizzazione delle riserve
- *OSSIGENO*: respirazione aerobia (fessurazione del tegumento seminale)
- *TEMPERATURA*: dipende dalla specie; ottimale 25-30°C
- *LUCE*: necessaria per piccoli semi (es. lattuga)



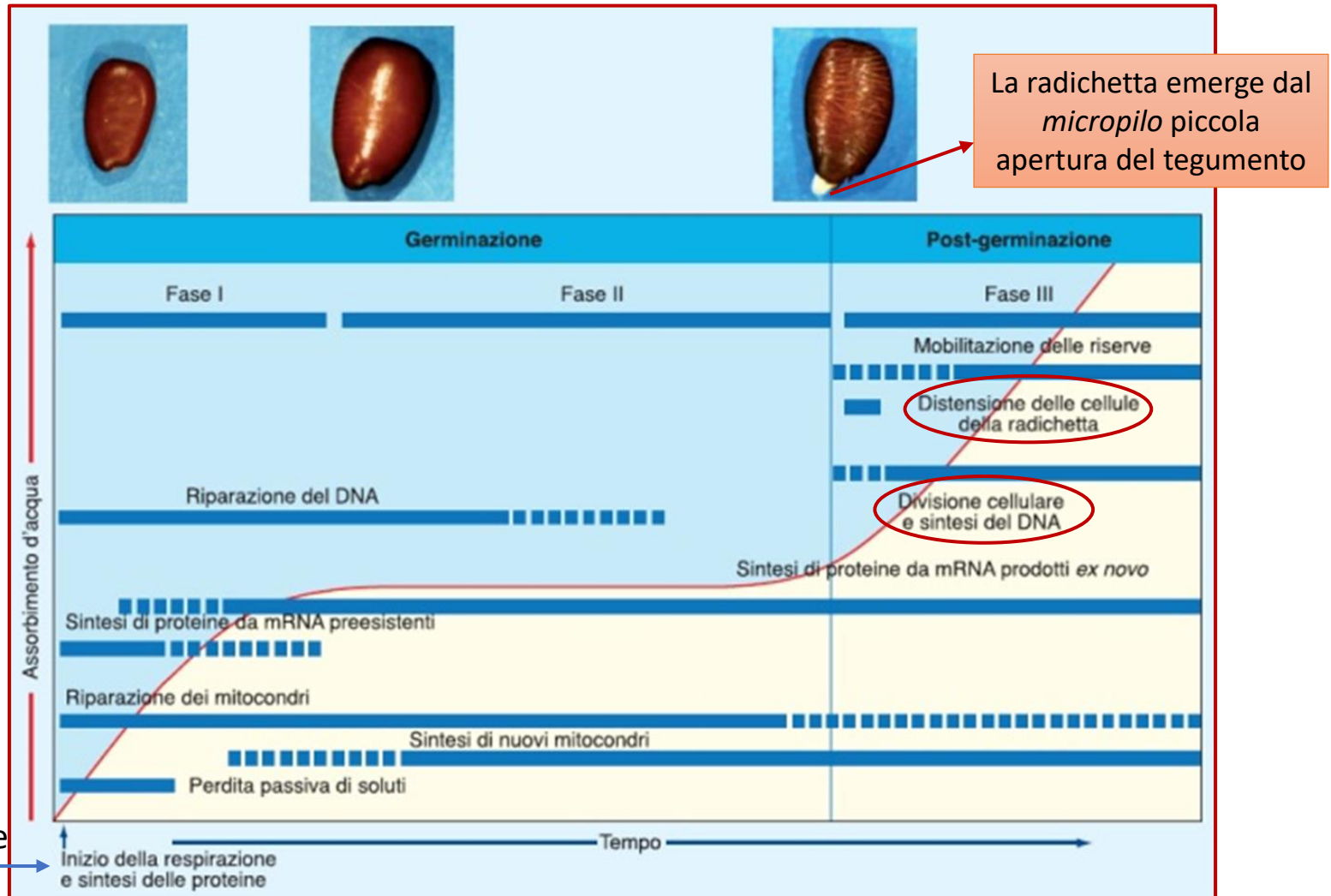
Variazione ormonale: rapporto GA - ABA

- Riduzione della concentrazione di acido abscissico (ABA)
- Aumento della concentrazione di acido gibberellico (GA)

Impiego delle riserve dell'endosperma
amido, lipidi e proteine

Assorbimento dell'acqua durante la germinazione

Andamento temporale dei principali processi cellulari associati alla germinazione

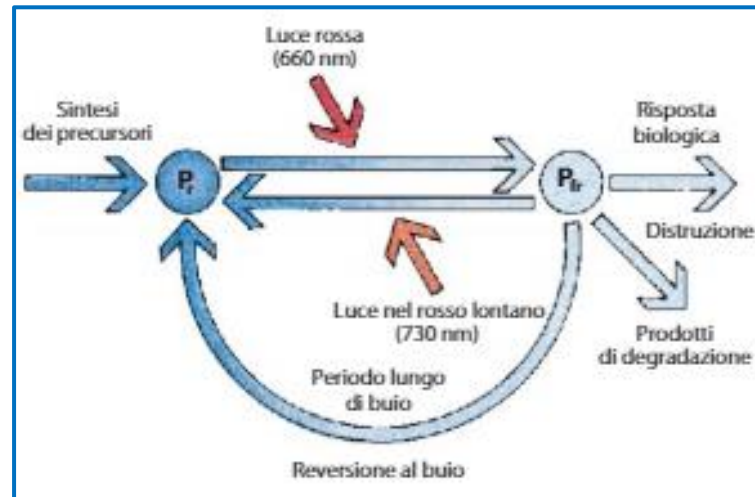


La *radichetta* (*radice embrionale*) permette al seme l'ancoraggio al suolo e l'assorbimento dell'acqua
La *radice primaria* (*fittone*) sviluppa le *radici laterali* (ramificazioni) che a loro volta ne originano altre
Le *radici avventizie* si originano dai nodi (monocotiledoni) e sviluppano radici laterali

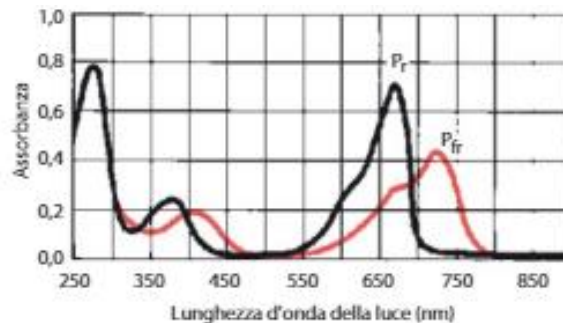
Effetto della luce sulla germinazione

Fitocromo = fotorecettore della luce nel rosso (660 nm) e rosso lontano (730 nm); coinvolto nella germinazione, fioritura e nella morfologia dello sviluppo delle piante

Può assumere due forme interconvertibili (P_r , P_{fr}): *reazione di fotoconversione*



Spettri d'azione: range di lunghezza d'onda della luce per la risposta biologica (es. germinazione)



Luce nel rosso: 620 – 700 nm

Luce nel rosso lontano: 700 – 800 nm

I semi di lattuga devono germinare su terreni sciolti e a poca profondità: *necessitano di luce*

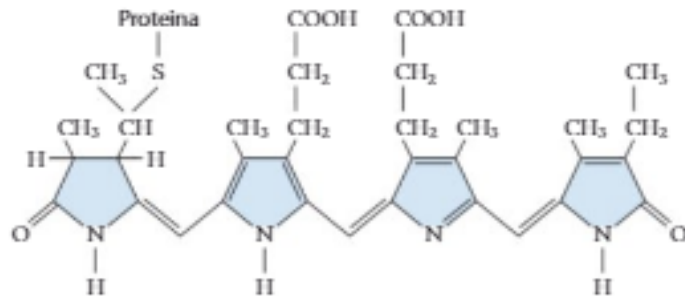


La luce nel rosso **STIMOLA** la germinazione
La luce nel rosso lontano **INIBISCE** la germinazione in modo più efficace del buio

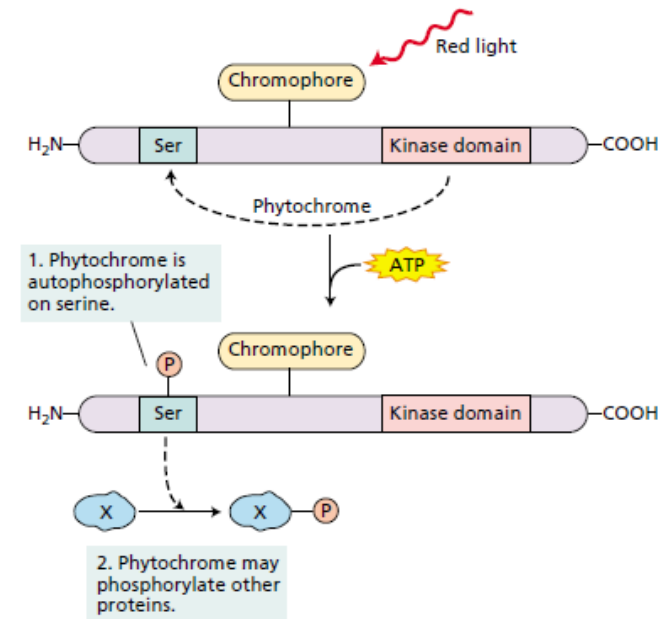
FITOCROMO

Proteina serina/treonina chinasi, capace di autofosforilazione (trasferimento gruppi fosfato dall'ATP ad amminoacidi della stessa proteina o di altre), sintetizzata nel cloroplasto e costituita due parti:

Oloproteina (phy) $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cromoforo (fitocromobilina): assorbe la luce (isomerizzazione } cis-trans \text{ in C15)} \\ \text{Apoptroteina (PHY): da sola non è capace di assorbire la luce} \end{array} \right.$



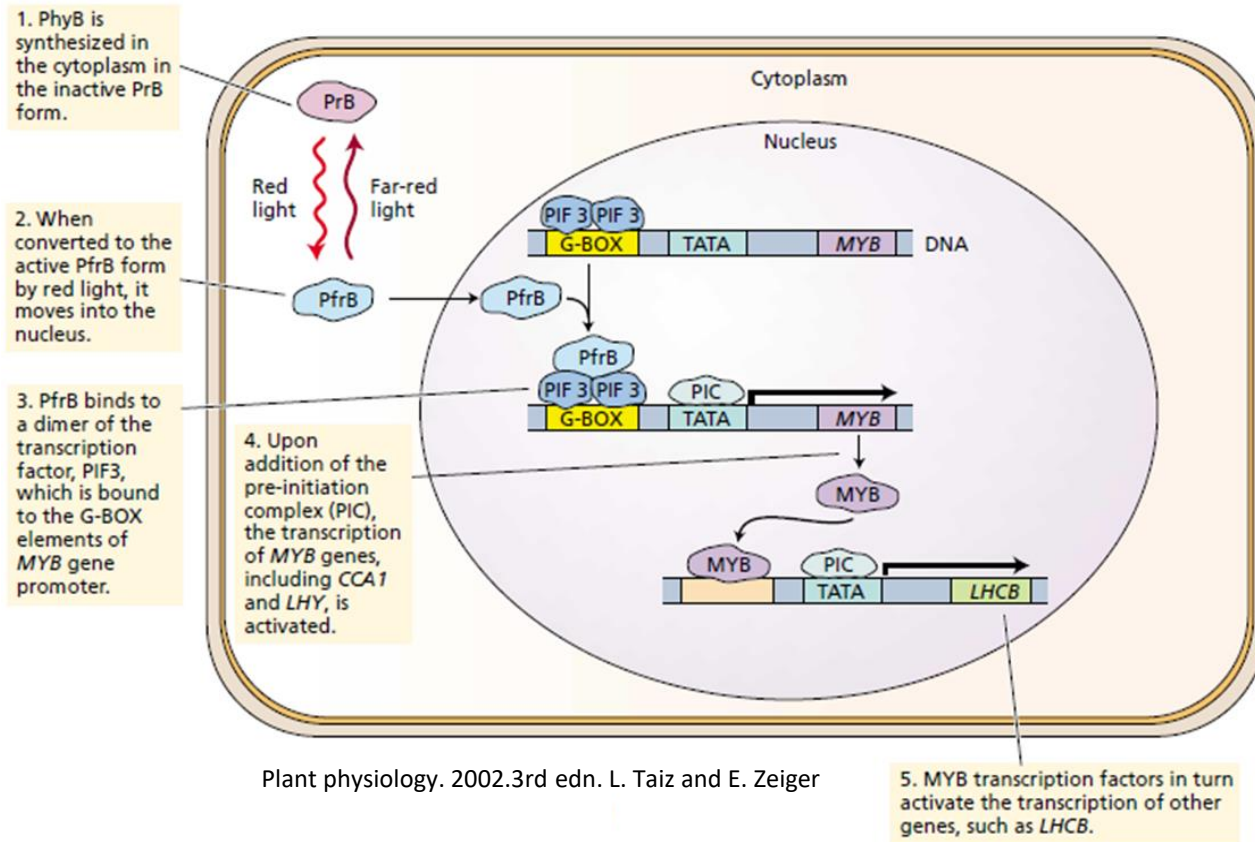
La biologia delle piante di Raven
ZANICHELLI



Plant physiology. 2002.3rd edn. L. Taiz and E. Zeiger

interruttore biologico, indotto dalla luce, che causa cambiamenti globali nella trascrizione genica

I cambiamenti conformazionali nell'apoproteina espongono il segnale di localizzazione nucleare (NLS) che spostano il fitocromo dal citosol al nucleo



Interazione fisica del cromoforo con proteine nucleari **PIF** (*fattori interagenti col fitocromo*) che si degradano alterando l'espressione genica in risposta alle variazioni della luce

Sviluppo della pianta mediato da fotorecettori meccanici (**Fotomorfogenesi**)

Variazione del rapporto ABA e GA

Ormone vegetale (fitormone): segnale chimico che regola e coordina il metabolismo, la crescita e la morfogenesi della pianta. Sono sintetizzati nello stesso tessuto e poi trasportati in tessuti diversi oppure sintetizzati nello stesso tessuto in cui agiscono



Auxine, citochinine, etilene, acido abscissico e gibberelline (acido gibberellico)

Altri ormoni vegetali

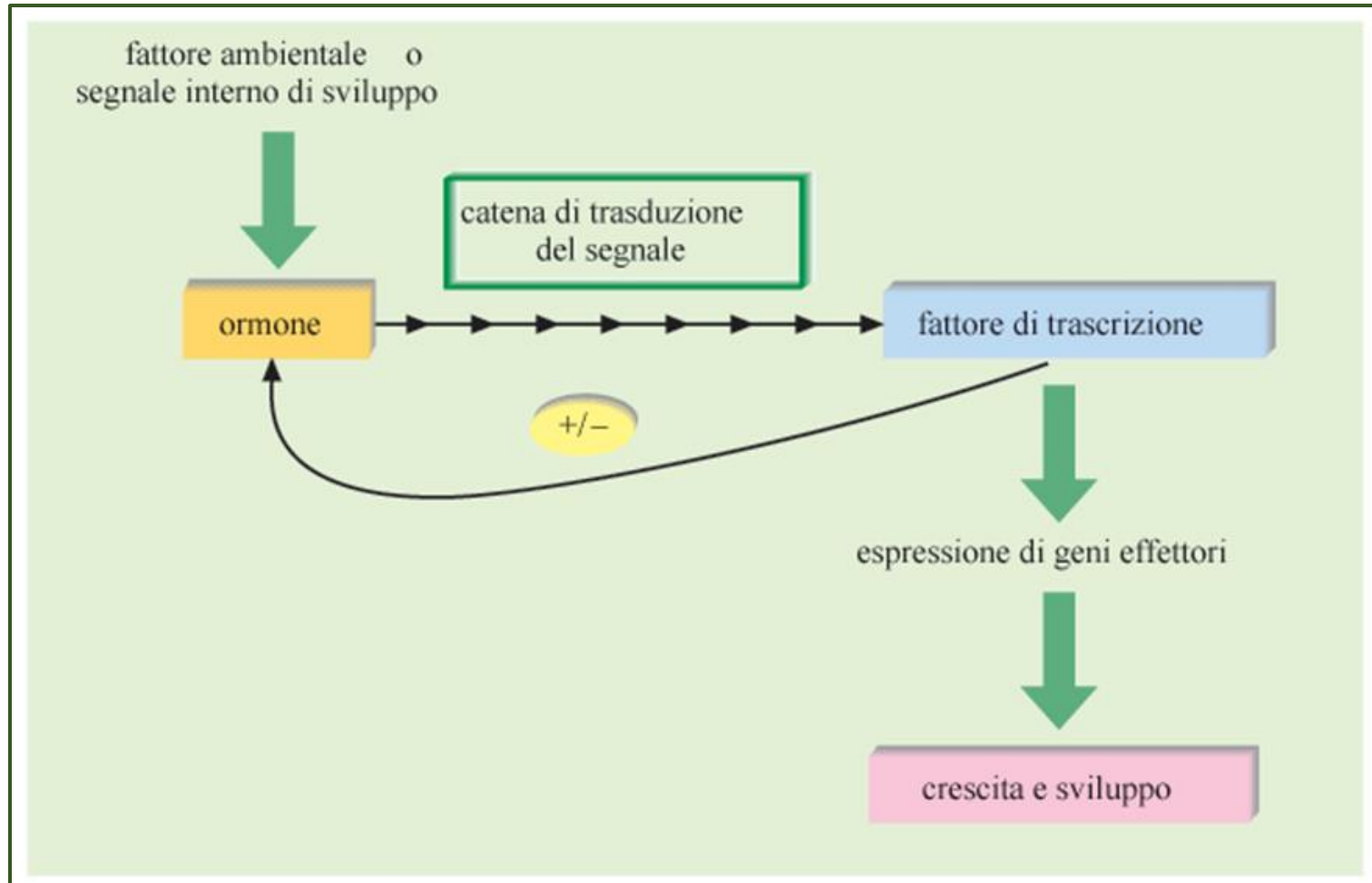
Brassinosteroidi: normale crescita dei tessuti

Florigeno: stimola la fioritura nel meristema apicale del germoglio

Molecole segnale coinvolte nella resistenza a patogeni
acido salicilico, acido giasmonico (giasmonato), sistemina

L'azione dell'ormone dipende dalla sua concentrazione e dalla sensibilità del tessuto all'ormone stesso

Interazioni tra ormoni vegetali, fattori di trascrizione e gli effetti sulla germinazione, crescita e sviluppo della pianta



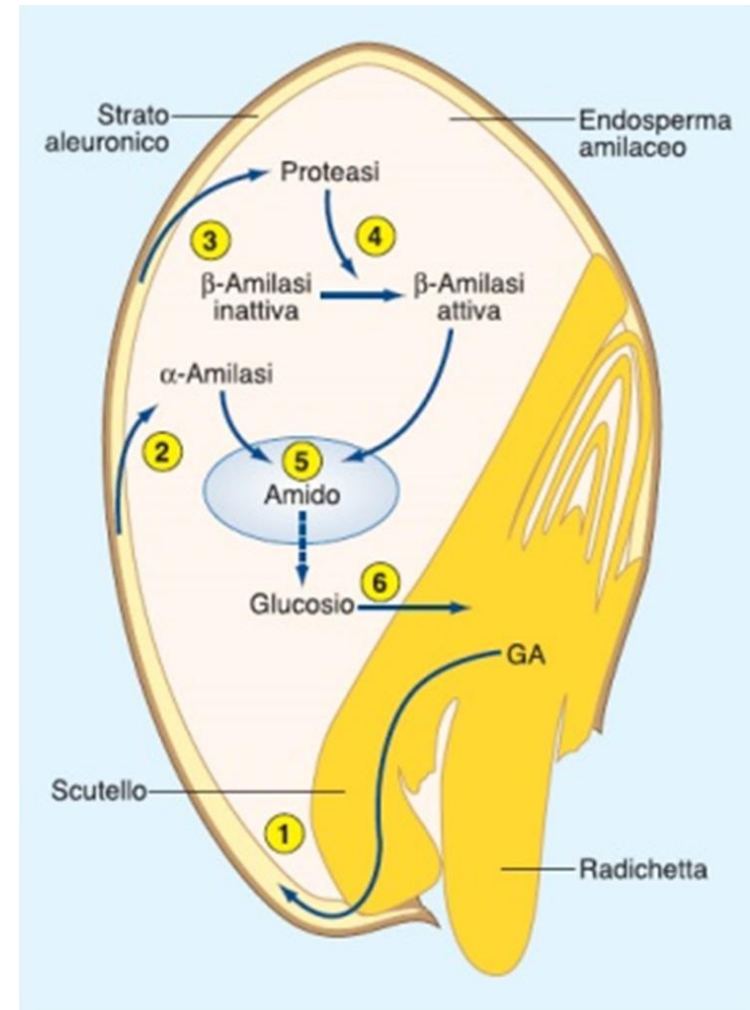
Variazione del rapporto tra acido abscissico (ABA) e gibberelline (GA)

ABA: inibisce la germinazione dei semi (stimola la dormienza) ed è coinvolto nella risposta allo stress idrico. Biosintesi aumenta con l'embriogenesi

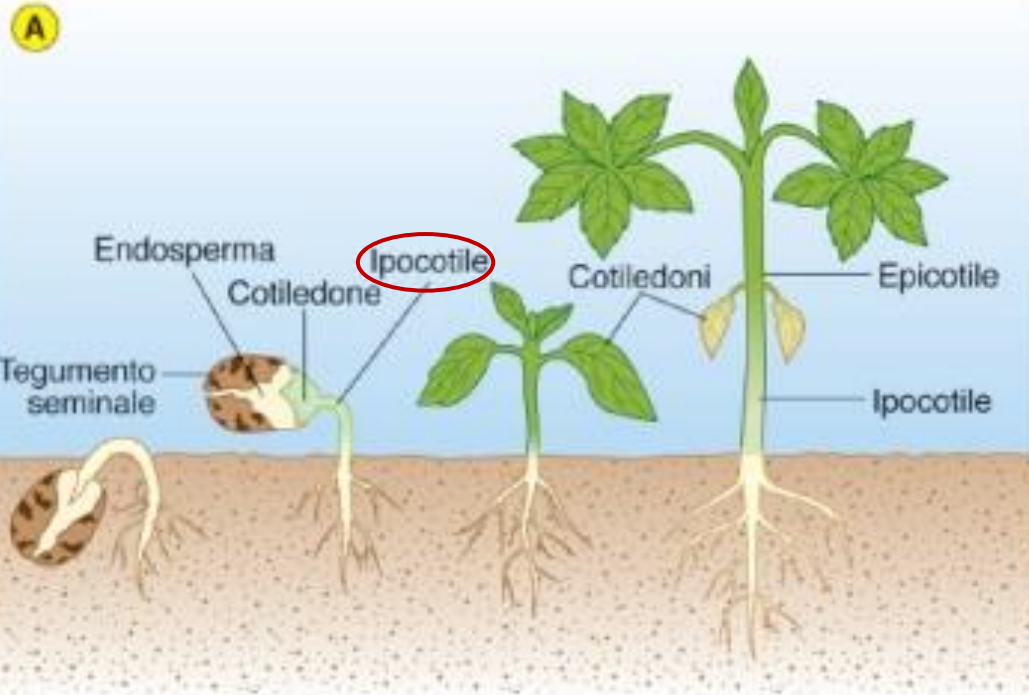
GA: stimolano la germinazione (inibiscono la dormienza) e influenzano molti processi cellulari (allungamento del fusto, divisione e distensione cellulare). Biosintesi stimolata dalla luce, temperatura e acqua. GA₃ (Acido Gibberellico)



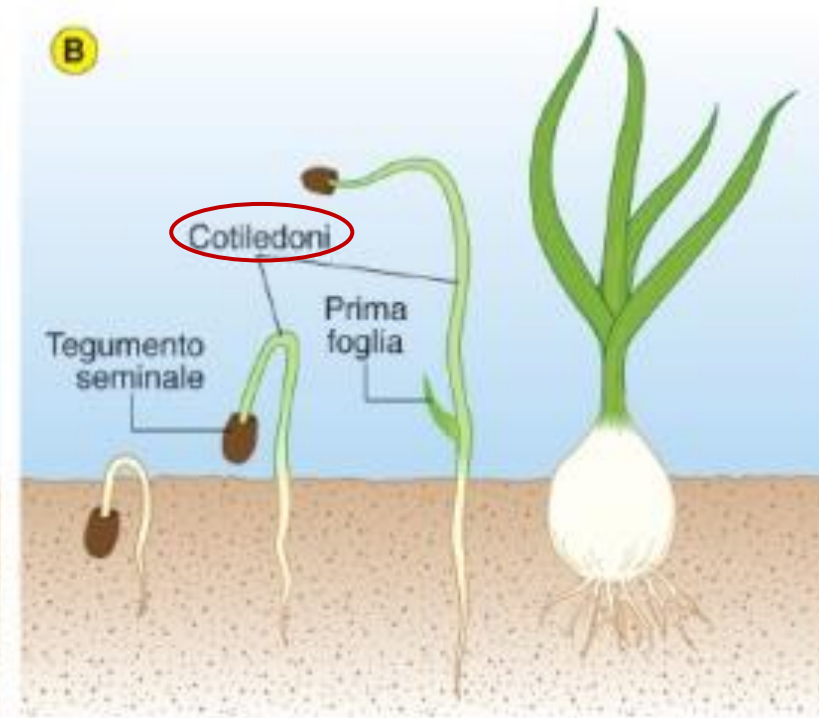
L'ABA inibisce la sintesi degli enzimi idrolitici (alfa-amilasi) necessari per degradare le riserve del seme



Fasi dello sviluppo di plantule epigee



Ricino
dicotiledone

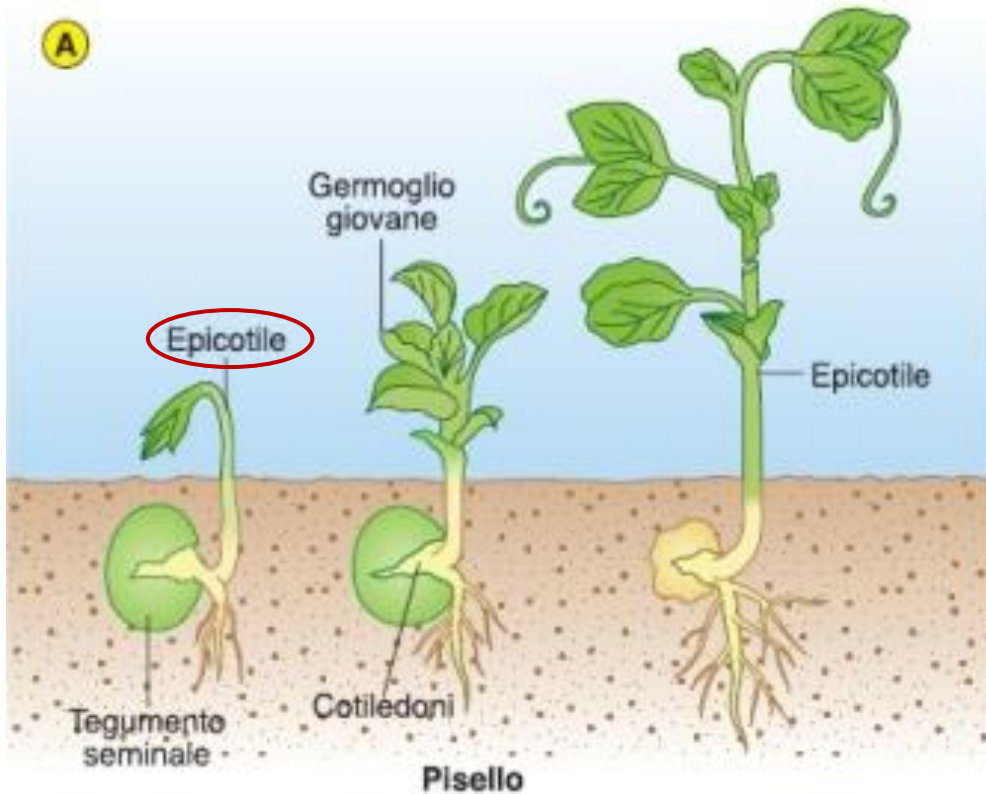


Cipolla
monocotiledone

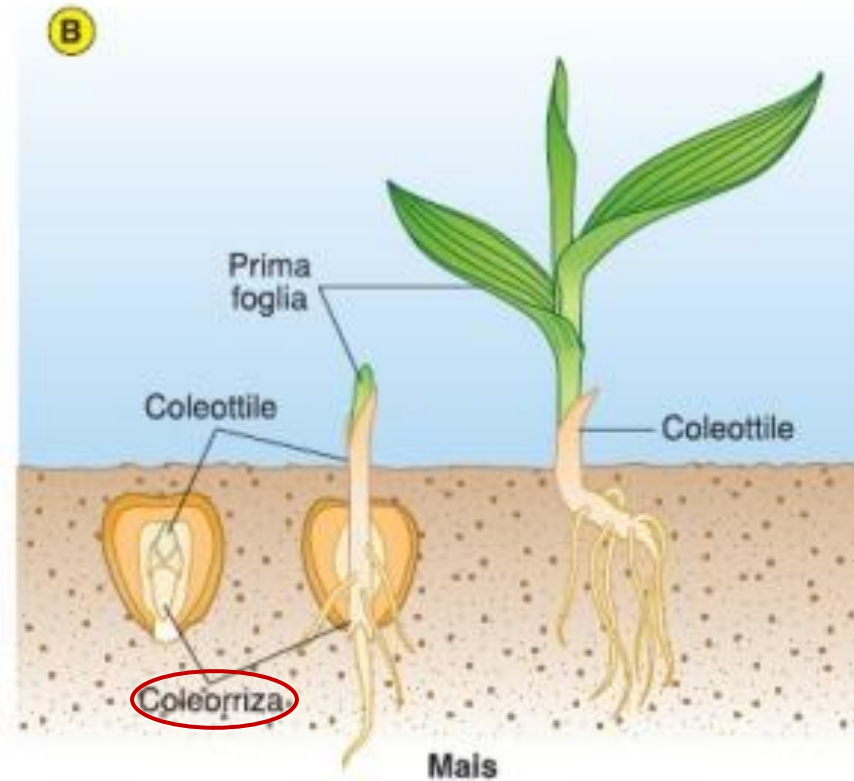
I cotiledoni diventano organi fotosintetizzanti più o meno importanti (dipende dalla specie)

Le riserve dei cotiledoni o dell'endosperma vengono digerite e trasportate a tutta la plantula;
La pianta non dipende più dalle riserve del seme ma diventa organismo *autotrofo*

Modelli di sviluppo ipogeo della plantula



dicotiledone

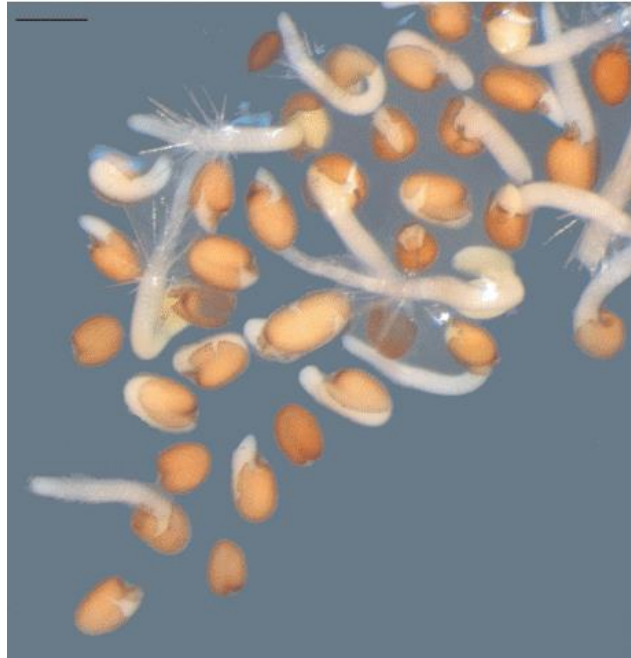


monocotiledone

I cotiledoni restano nel terreno e si decompongono dopo che sono state utilizzate le riserve

Struttura e sviluppo della radice

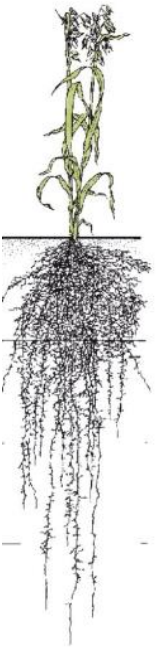
La prima struttura ad emergere dal seme (micropilo) è la radichetta (radice embrionale). Il processo è asincrono



Funzioni della radice

- principali {
- **Ancoraggio** al suolo della piantina in via di sviluppo
 - **Assorbimento** dell'acqua
 - Riserva delle sostanze nutritive (piante biennali)
 - Conduzione delle sostanze nutritive, acqua, ioni inorganici e ormoni
 - Rigenerazione clonale (presenza di gemme)
 - Secrezione di essudati

Sistemi di radici



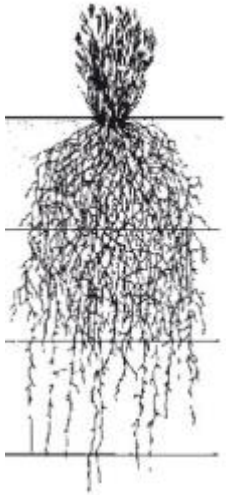
FASCICOLATA (monocotiledoni); *sistema più superficiale*

Radice primaria: vita breve

Radici avventizie: alla base del fusto sviluppano l'apparato radicale

Radici laterali: ramificazioni delle radici avventizie

Gravità, luce, gradienti di umidità,
temperatura, nutrienti del suolo (N, P)



FITTONE (eudicotiledoni); *sistema più profondo*

Radice primaria: cresce verso il basso, si forma nell'embrione

Radici laterali: le vecchie vicine al colletto (zona di incontro radice-fusto),
le giovani vicine all'apice della radice

Il rapporto radice/germoglio diminuisce con l'età della pianta



Cuffia (cellule parenchimatiche VIVE)
Protegge il meristema apicale e aiuta la radice a penetrare nel terreno

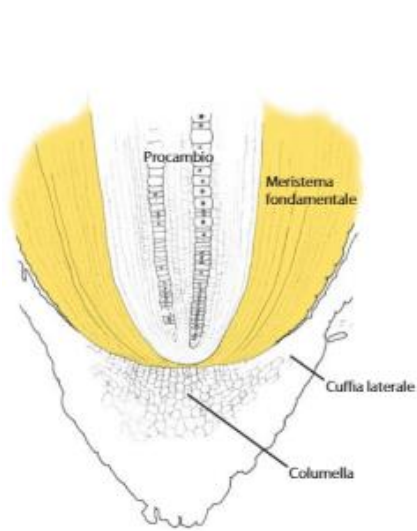


Rileva, elabora e trasmette i segnali al meristema e alla zona di allungamento (controllo della direzione di crescita)

(polisaccaride) che lubrifica la radice durante il passaggio nel terreno

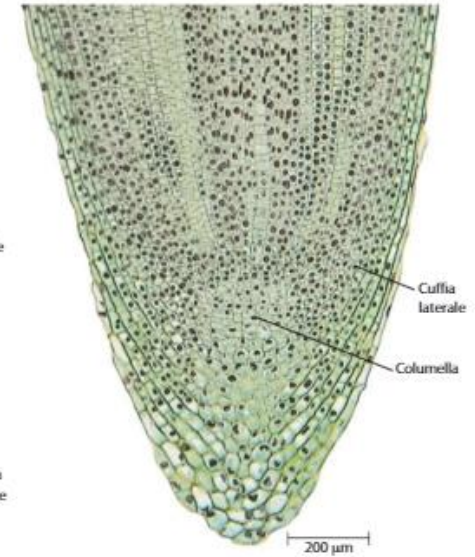
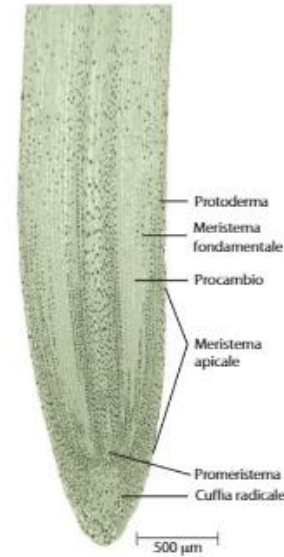
Le cellule periferiche (di frontiera) rilasciate nel terreno producono essudati ricchi di carbonio

Organizzazione dell'apice radicale



CHIUSO

strati meristemati indipendenti
(monocotiledone)



APERTO

Gli strati hanno origine comune
(dicotiledone)

Centro quiescente (promeristema): regione relativamente inattiva del meristema apicale

Origine embrionale del meristema apicale e della radice

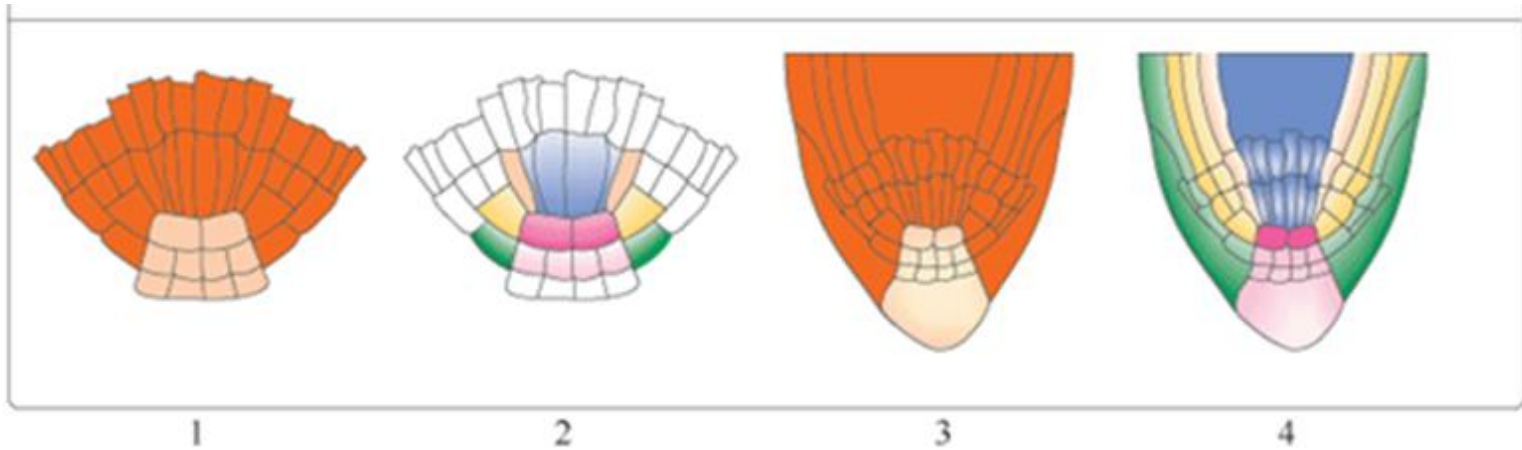
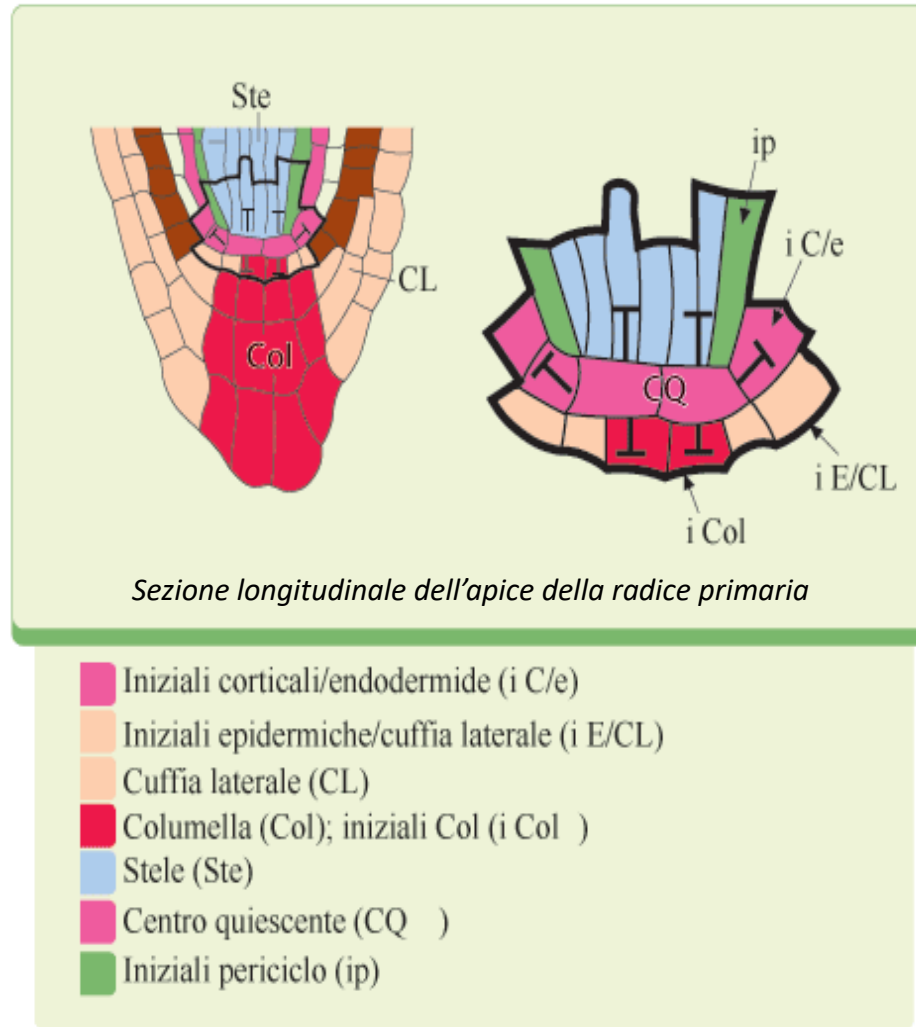


Fig. c2 (meristema apicale della radice)

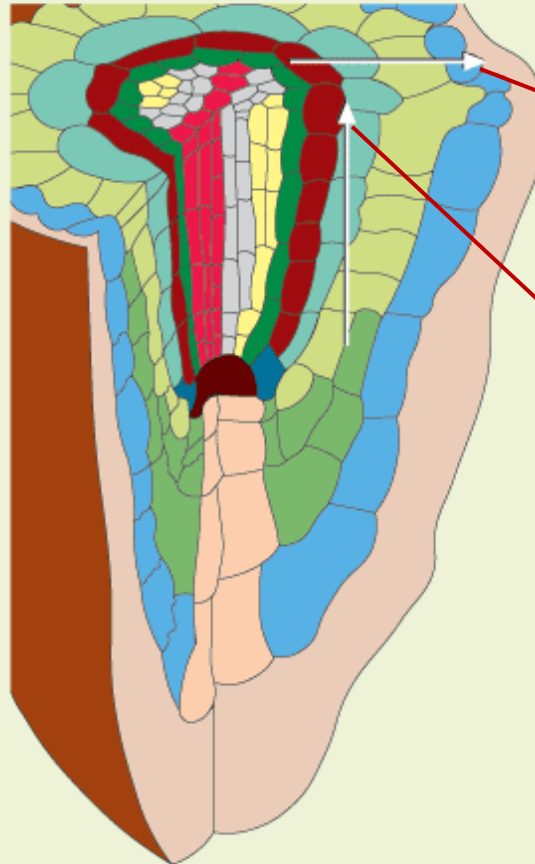
Fig. c4 (apice di una radice matura)

	Centro quiescente		Centro quiescente
	Iniziali della columella		Columella
	Iniziali di epidermid e cuffia lateral e		Epidermid e cuffia lateral e
	Iniziali di corteccia ed endodermide		Corteccia ed endodermid e
	Iniziali del periciclo		Periciclo
	Iniziali del tessuto vascolare		Procambi o

La posizione delle cellule e la loro direzione di divisione determinano il tipo di cellula che si svilupperà



Le cellule del centro quiescente circondate dalle iniziali meristematiche sono coinvolte nell'organizzazione del corpo primario della radice



Differenziamento longitudinale
(pattern distale; spessore)

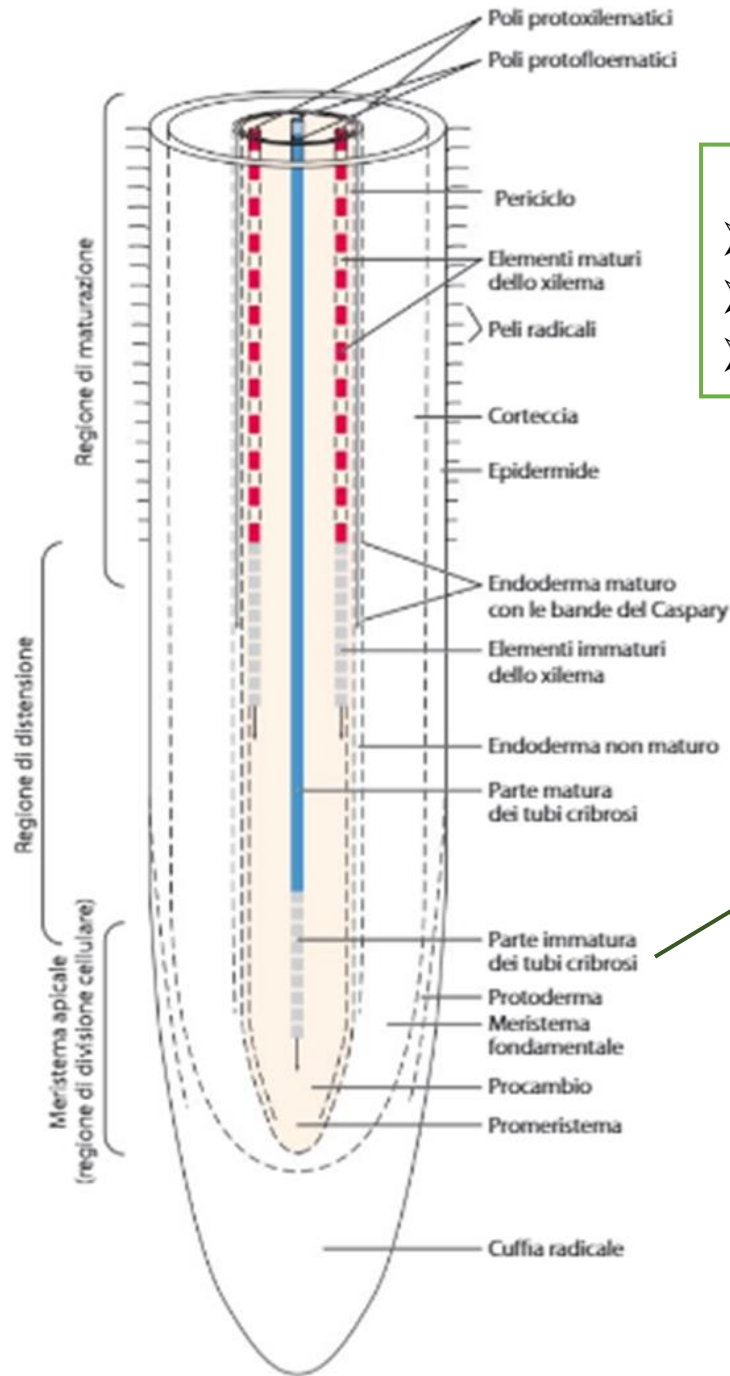
Differenziamento trasversale
(pattern radiale; lunghezza)

*Organizzazione apicale e tissutale del corpo
primario di una radice (Arabidopsis)*

■ Xilema	■ Epidermide
■ Procambio	■ Iniziali endodermide/cortical
■ Floema	■ Centro quiescente
■ Periciclo	■ Columella/cuffia radicale
■ Endodermide	■ Iniziali epidermide/cuffia la
■ Corteccia	■ Cuffia radicale laterale

cellule dei tessuti
primari mature
(zona pilifera)

Incremento in
lunghezza (pochi mm)



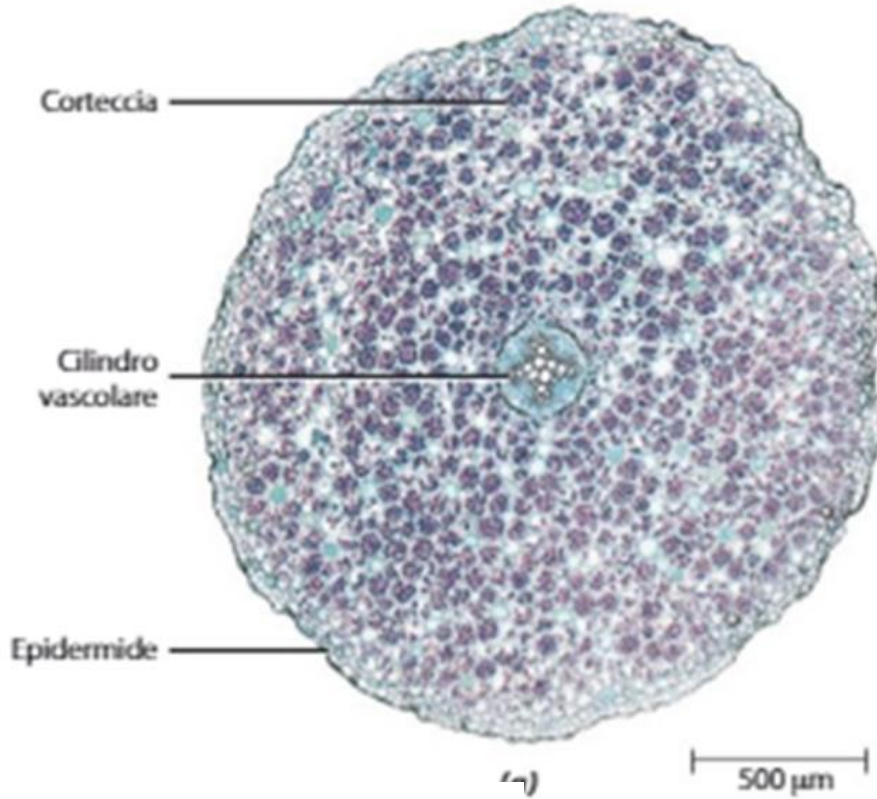
- Struttura primaria
- *Epidermide* (dermico)
 - *Corteccia* (fondamentale)
 - *Vascolare* (conduttore)

Gli elementi del floema
si forma per primi

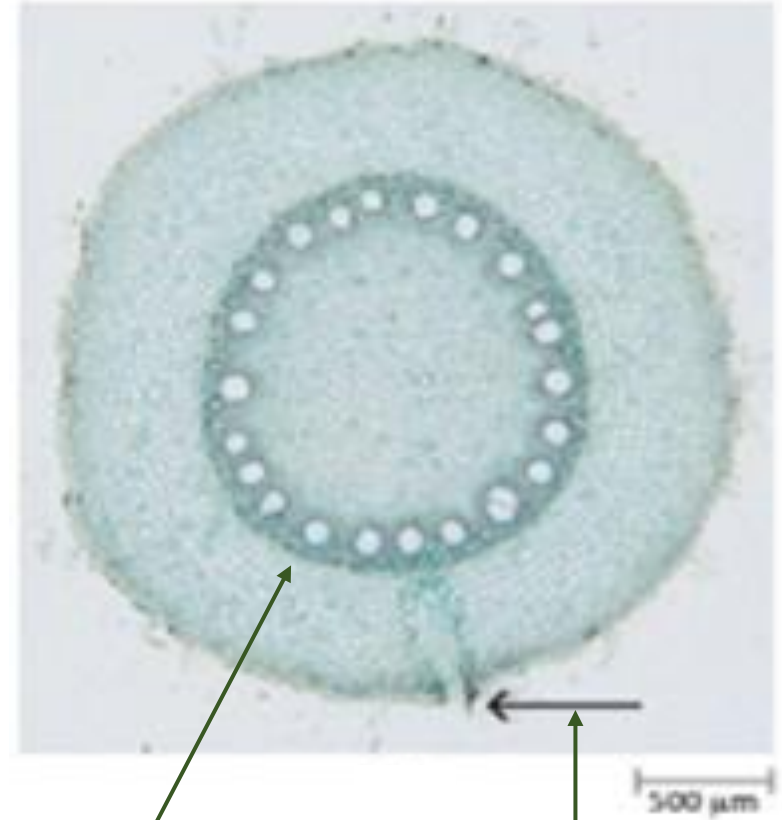
Trasporto di linfa elaborata
per la crescita delle radici

Struttura generale di una radice

Dicotiledone
Xilema e Floema centralizzati



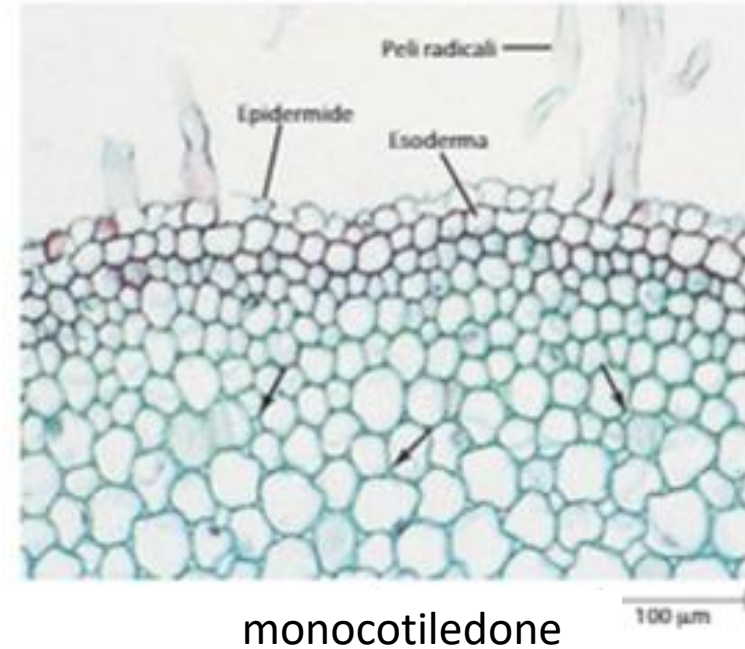
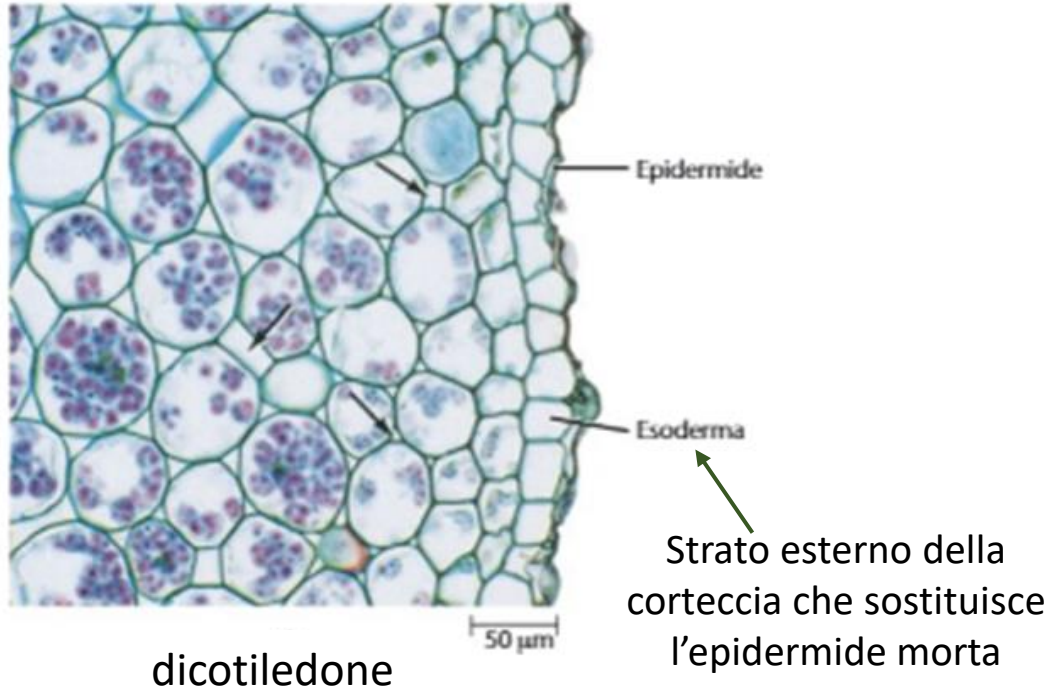
Monocotiledone
Parenchima circondato da
Xilema e Floema



Cilindro vascolare

parte di una
radice laterale

Epidermide *tessuto tegumentale*



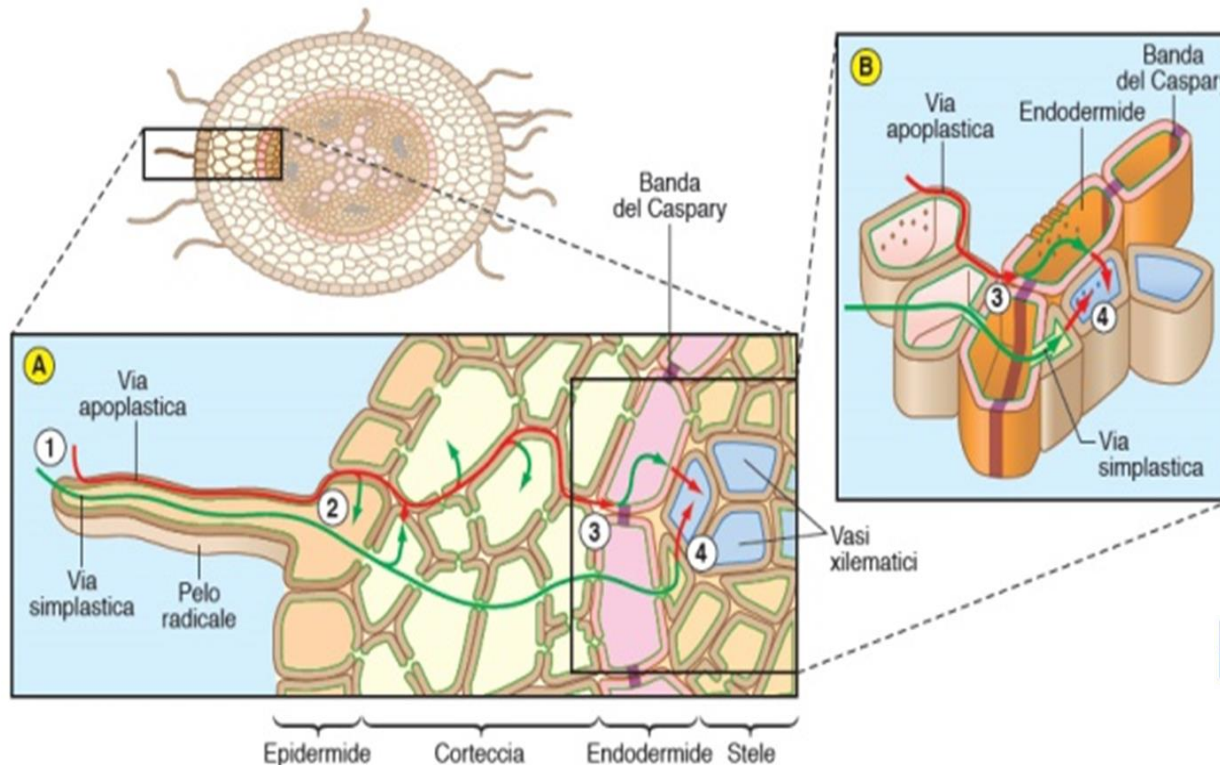
- Cellule allungate con pareti sottili e prive di cuticola
- Assorbimento di acqua e sali minerali (radici giovani e sottili)
- Presenza di peli radicali: estensioni delle cellule epidermiche che aumentano la superficie di assorbimento

Corteccia

tessuto fondamentale (parenchima, collenchima, sclerenchima)

I plastidi accumulano amido e sono privi di clorofilla; le cellule formano ampi spazi intercellulari (**aerenchima**)

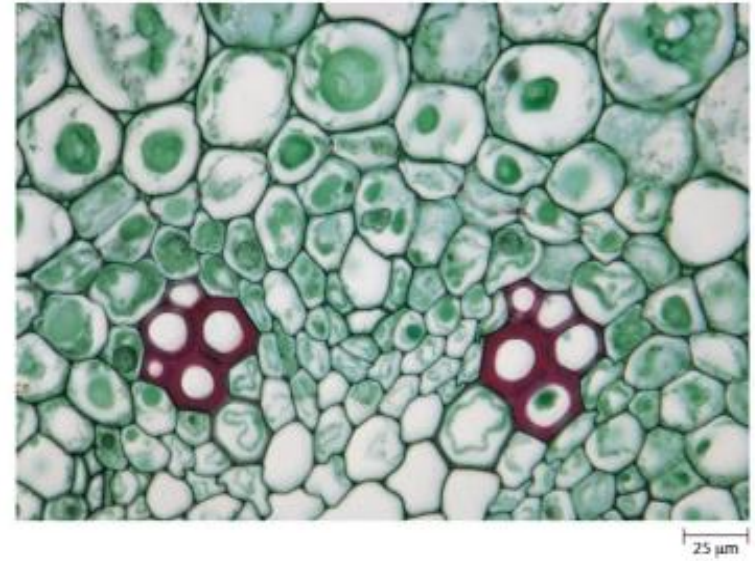
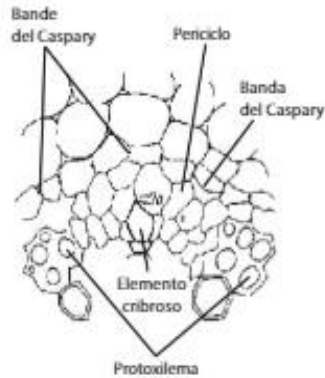
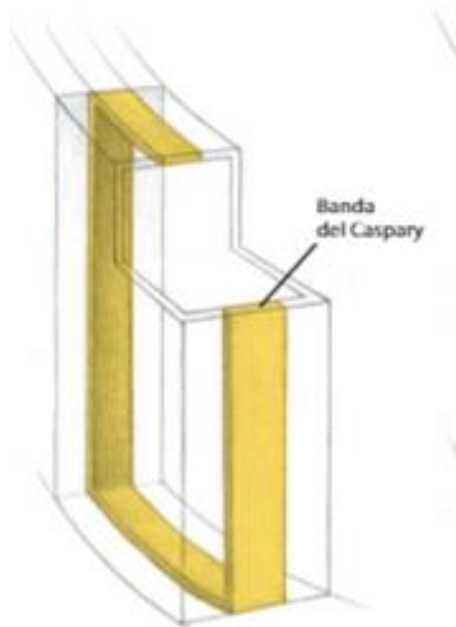
Endoderma: strato interno, compatto, formato da un cilindro di cellule le cui pareti radiali e trasversali presentano le bande del Caspary



Via simplastica: attraverso i protoplasti mediante i plasmodesmi

Via apoplastica: attraverso gli spazi intercellulari e/o le pareti cellulari

Banda di Caspary: stretta banda (parete primaria e lamella mediana) impregnata di suberina e a volte di lignina, che conferisce proprietà idrofobe e funge da barriera al movimento intercellulare di acqua, ioni e soluti verso le cellule vascolari



Il trasporto apoplastico di acqua e soluti attraverso l'endoderma è bloccato
Le sostanze passano attraverso il trasporto simplastico dell'endoderma

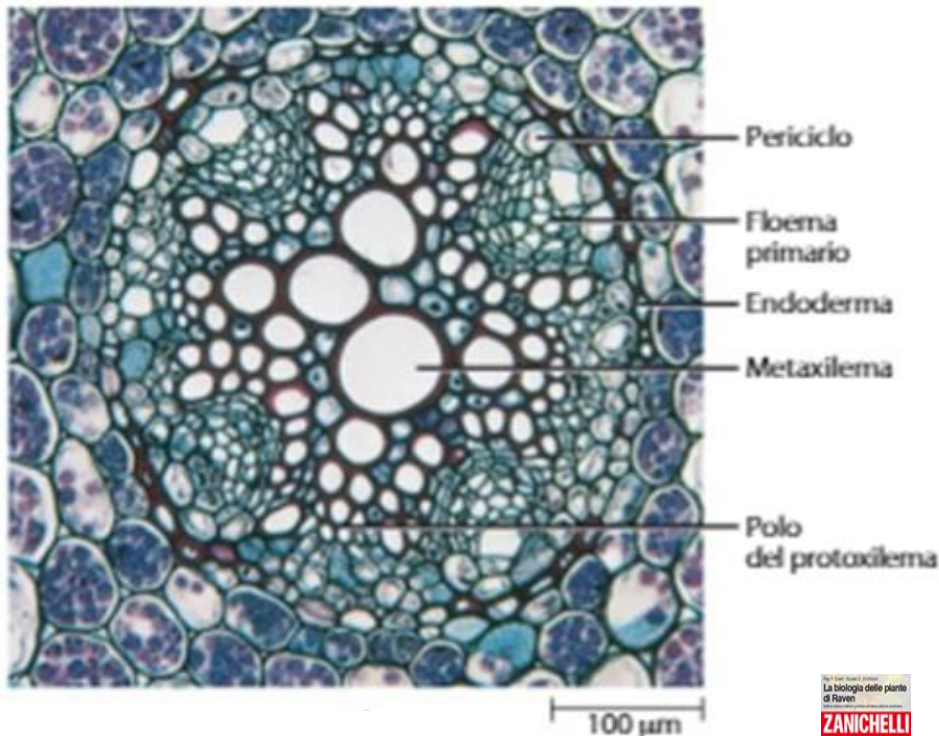
Esoderma: strato esterno della corteccia con cellule compatte e bande del caspary; le pareti suberificate impediscono le perdite di acqua e fungono da difesa per diversi patogeni

Cilindro vascolare o centrale

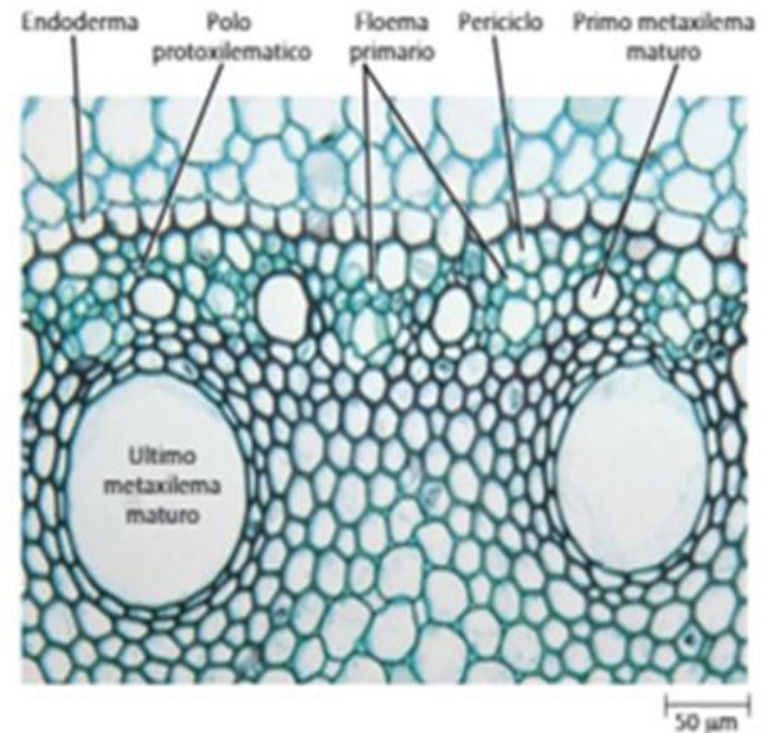
Periciclo: cellule non vascolari, origina le radici laterali, e contribuisce a formare il cambio cribro-vascolare e cambio subero-fellodermico

Tessuto vascolare: parte centrale costituita da fasci (arche) di xilema primario tra le quali si trovano i fasci di floema primario (ACTINOSTELE)

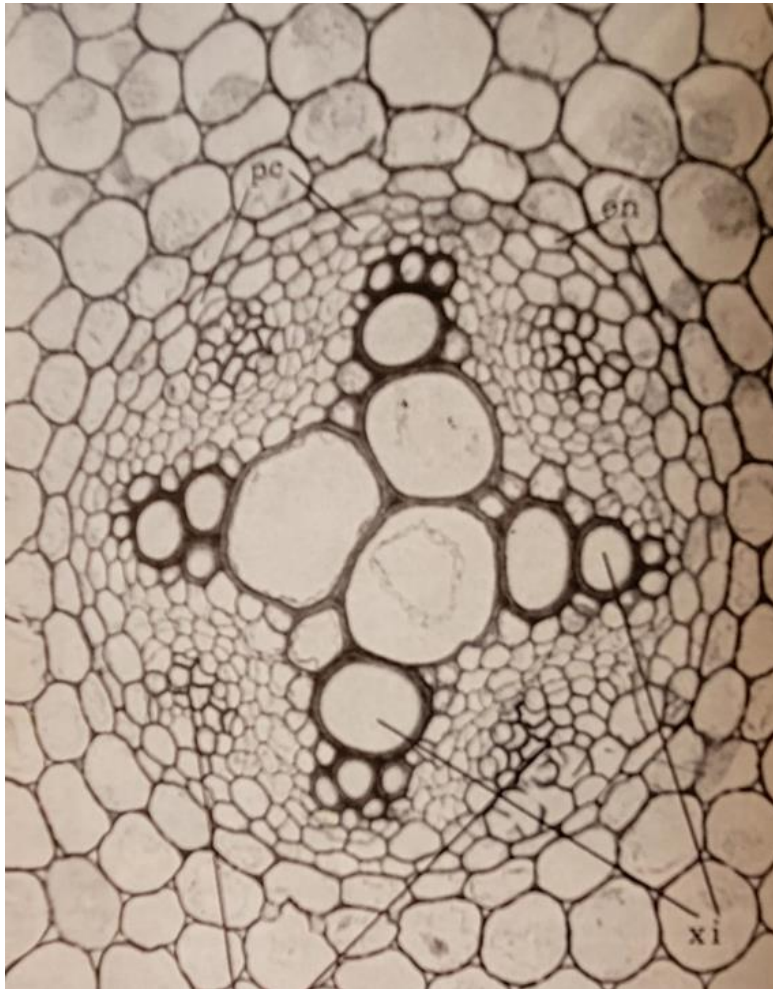
Dicotiledoni: Xilema e Floema centralizzati



Monocotiledoni: midollo (parenchima) circondato da Xilema e Floema

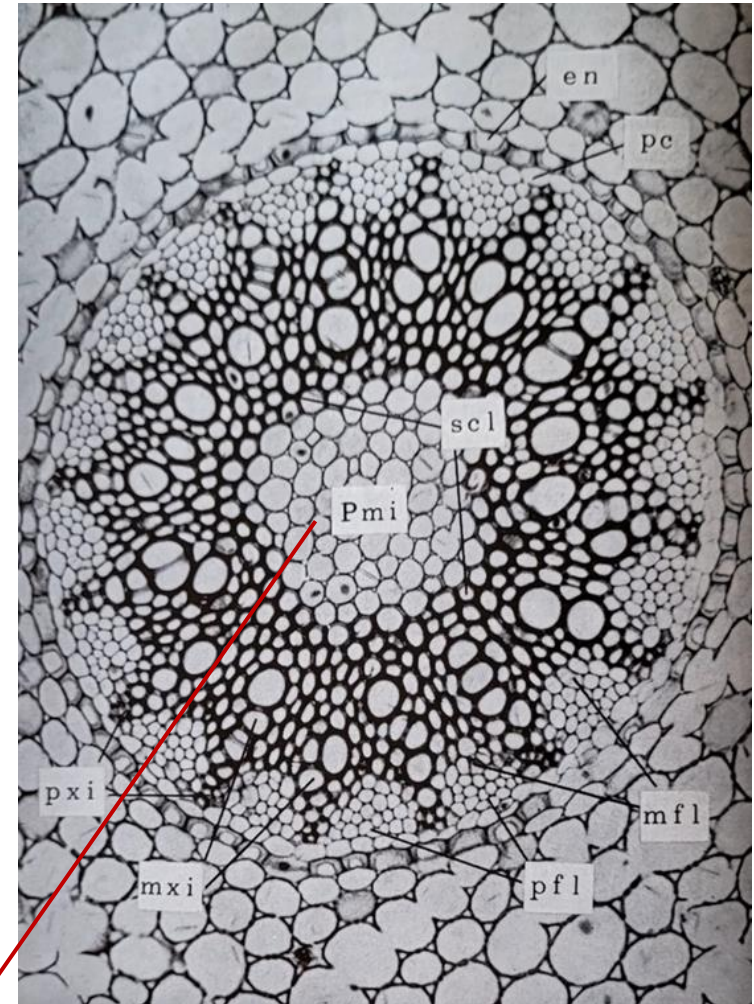


sezione trasversale di una struttura primaria di una radice di dicotiledone



fl, floema

sezione trasversale di una struttura primaria di una radice di monocotiledone

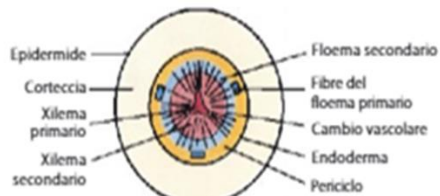


midollo

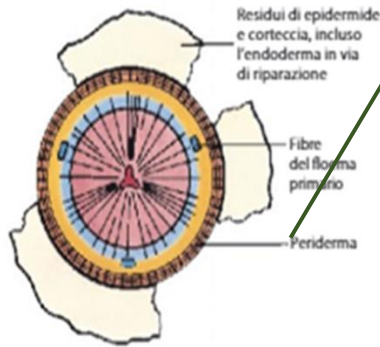
Crescita secondaria

- *Floema e Xilema*: tessuti vascolari secondari originati dal Cambio cribro-vascolare
- *Periderma*: strato protettivo (sughero) originato dal cambio subero-fellodermico

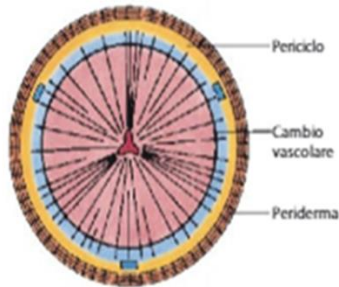
Sviluppo SECONDARIO



(d)



(e)



(f)

Sughero: verso l'ESTERNO
Cambio subero-fellodermico (cilindro)
Felloderma: verso l'INTERNO

Le monocotiledoni non hanno crescita secondaria;
sono costituite solo da tessuti primari

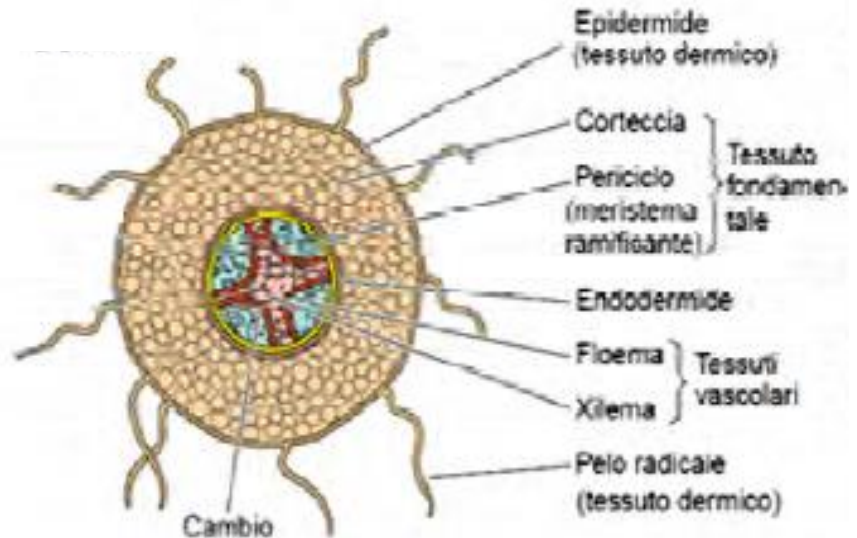
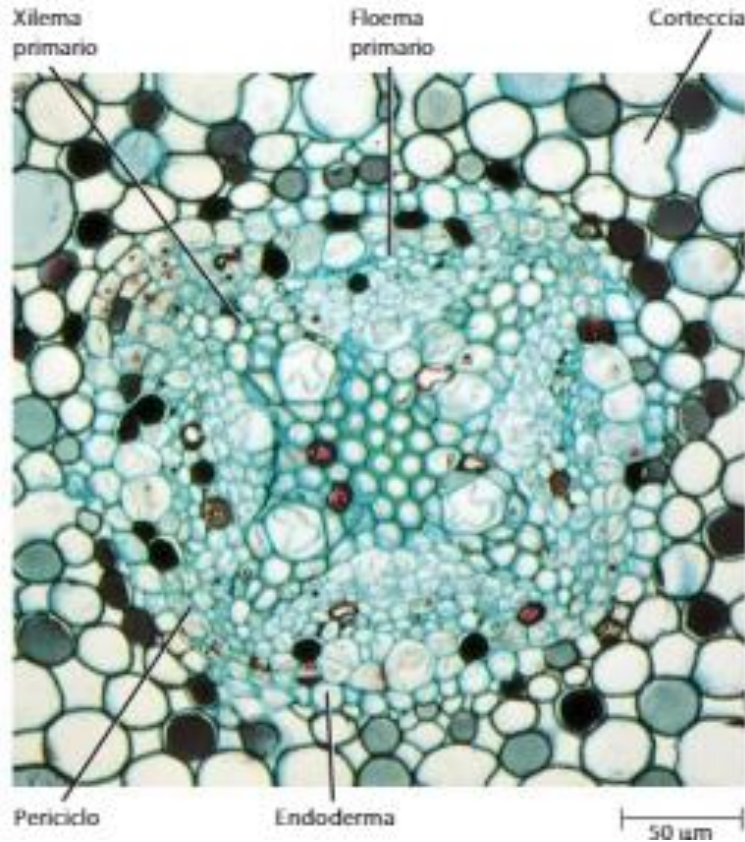
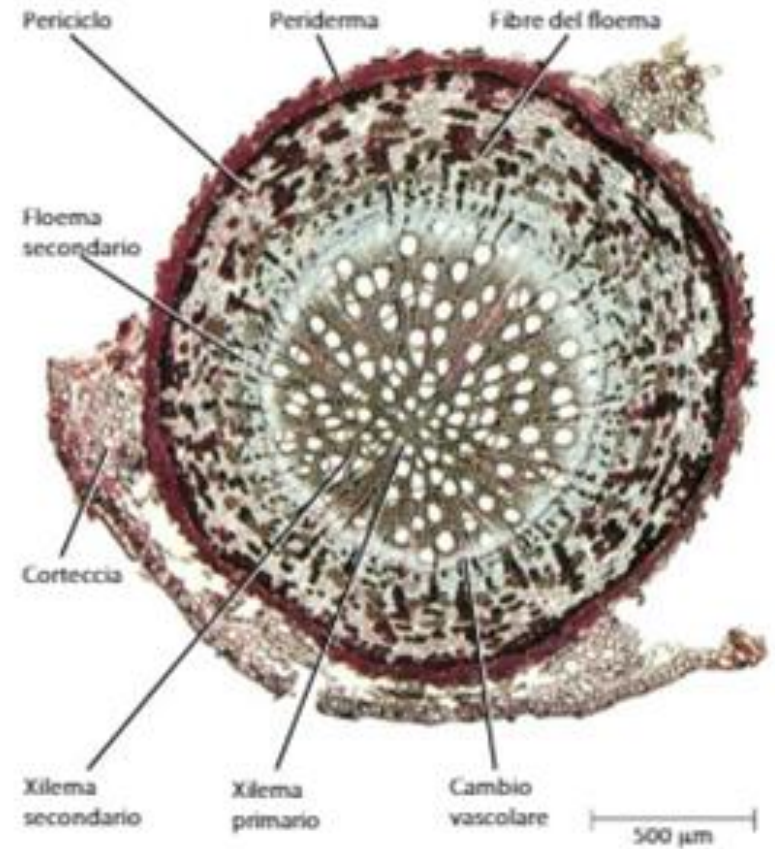


Foto dal Web

Crescita primaria e secondaria di una radice di dicotiledone



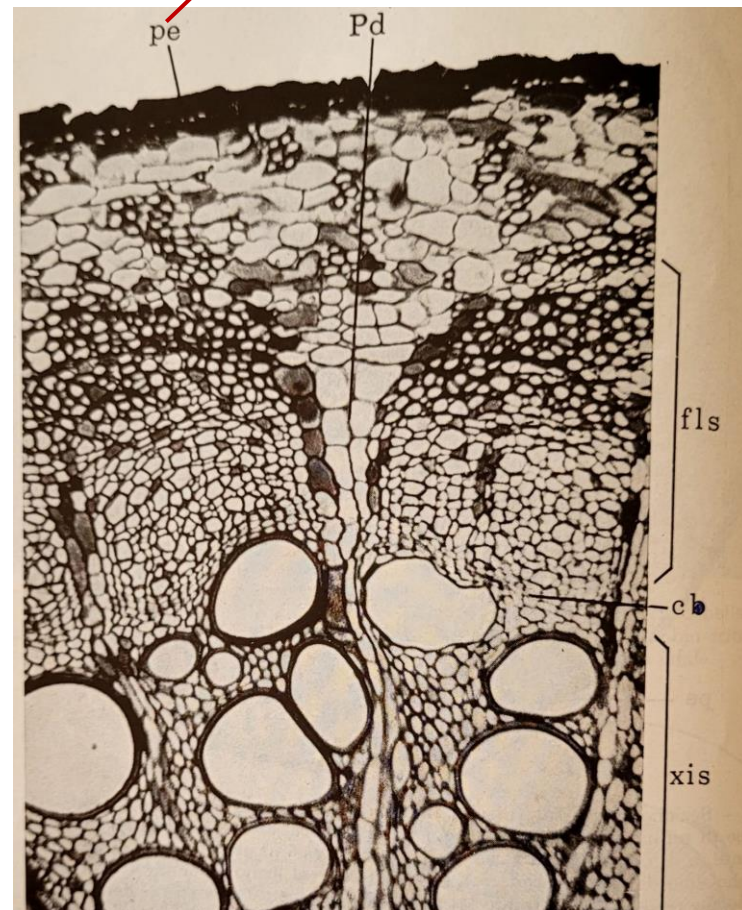
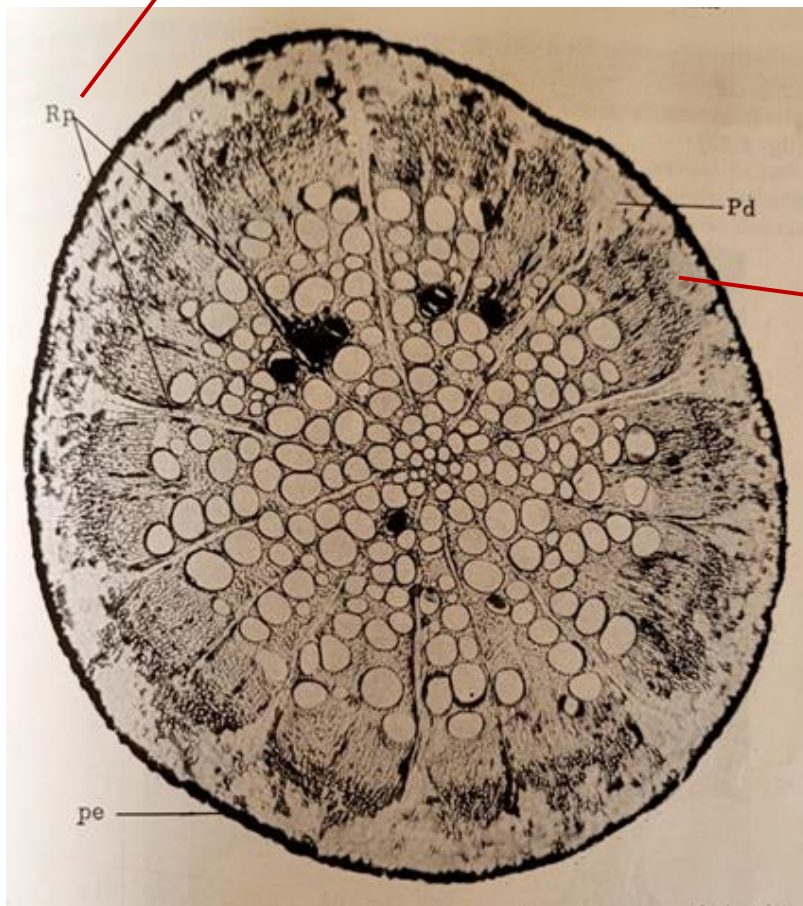
Cilindro vascolare primario
dopo il primo anno di sviluppo



Cilindro vascolare secondario

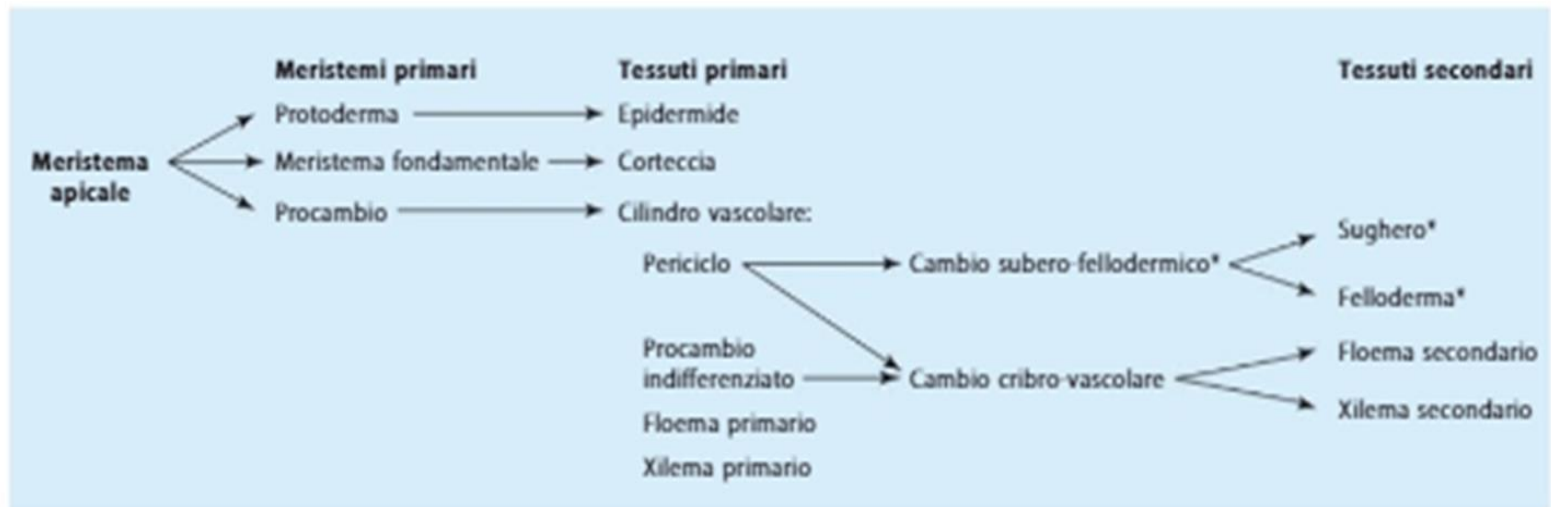
raggi parenchimatici

periderma



Struttura secondaria di una radice di dicotiledone

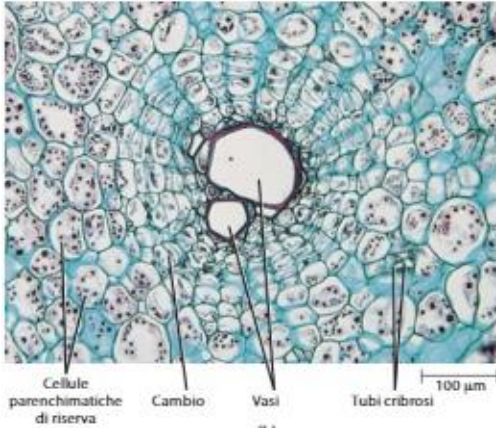
Riepilogo dello sviluppo di una radice durante il primo anno



*Nel loro insieme costituiscono il periderma

Adattamenti morfologici

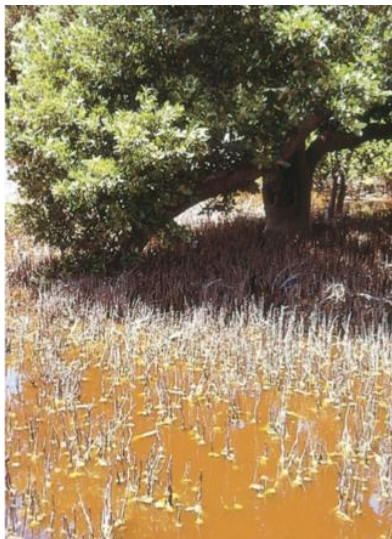
Radici succulente: abbondante parenchima con funzione di riserva (es. patata dolce)



Radici di sostegno: prodotte da strutture epigee (fusto) per il sostegno (es. mais)



Radici aeree: si sviluppano verso l'alto per fornire aria alle radici (ambienti paludosi)



velamen: epidermide pluristratificata; sostegno, assorbimento dell'acqua e prevenzione della disidratazione (orchidee)



Gravitropismo: crescita in risposta alla gravità

POSITIVO: la radice cresce verso il basso

NEGATIVO: il germoglio cresce verso l'alto



Ridistribuzione di AUXINA
tra l'apice del germoglio e
l'apice della radice

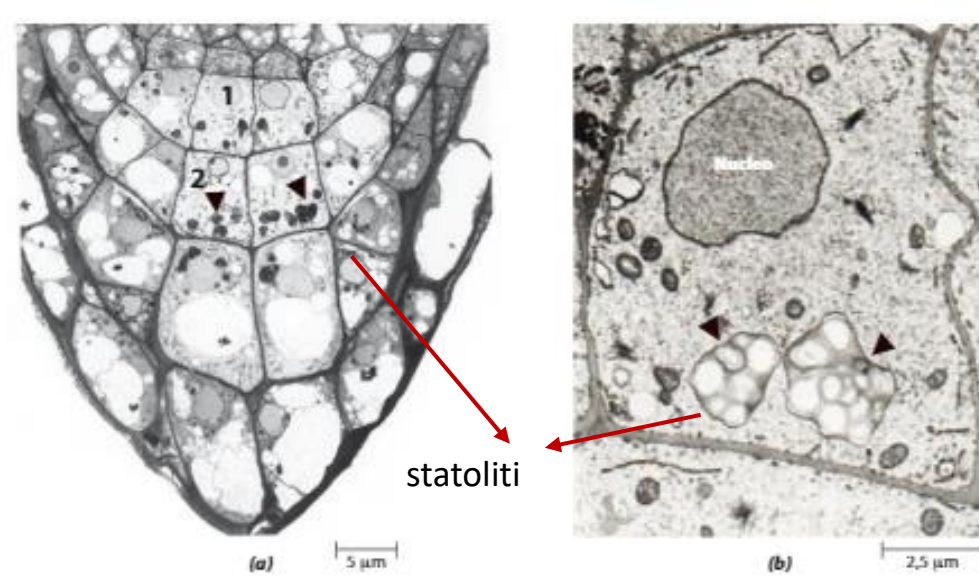
Base del germoglio → stimola espansione cellulare → curvatura verso l'alto del fusto

Base della radice → inibisce l'espansione cellulare → curvatura verso il basso della radice
(più sensibile all'auxina) (maggiore velocità di espansione parte alta)

Percezione della gravità: STATOLITI (amiloplasti del fusto e della radice) presenti negli statociti



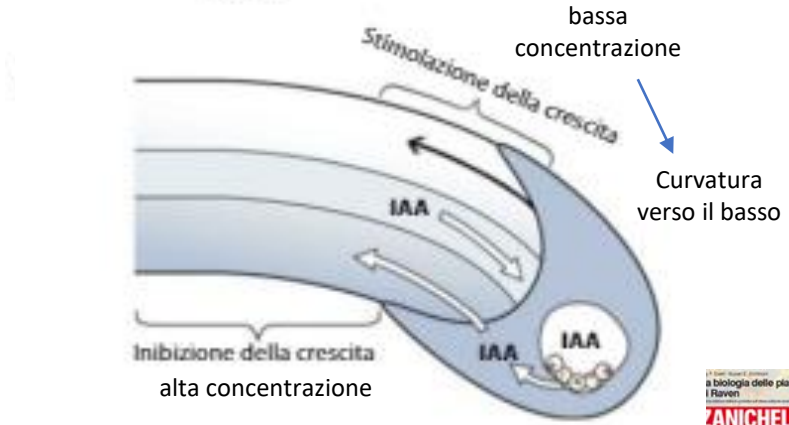
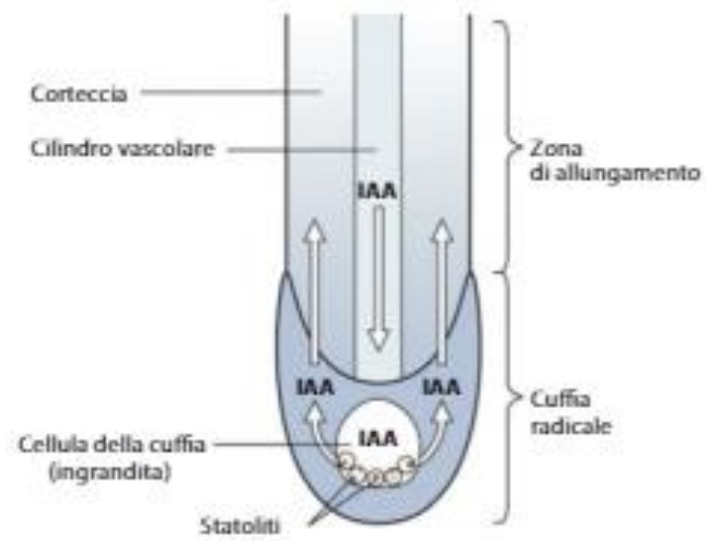
Guaina amilifera: strato interno del fusto e della radice (coleottila), circonda i fasci vascolari



Nella radice gli *statociti* contenenti *statoliti* si trovano nella *columella* della cuffia radicale. Gli statoliti si sedimentano lungo la parete trasversale delle cellule

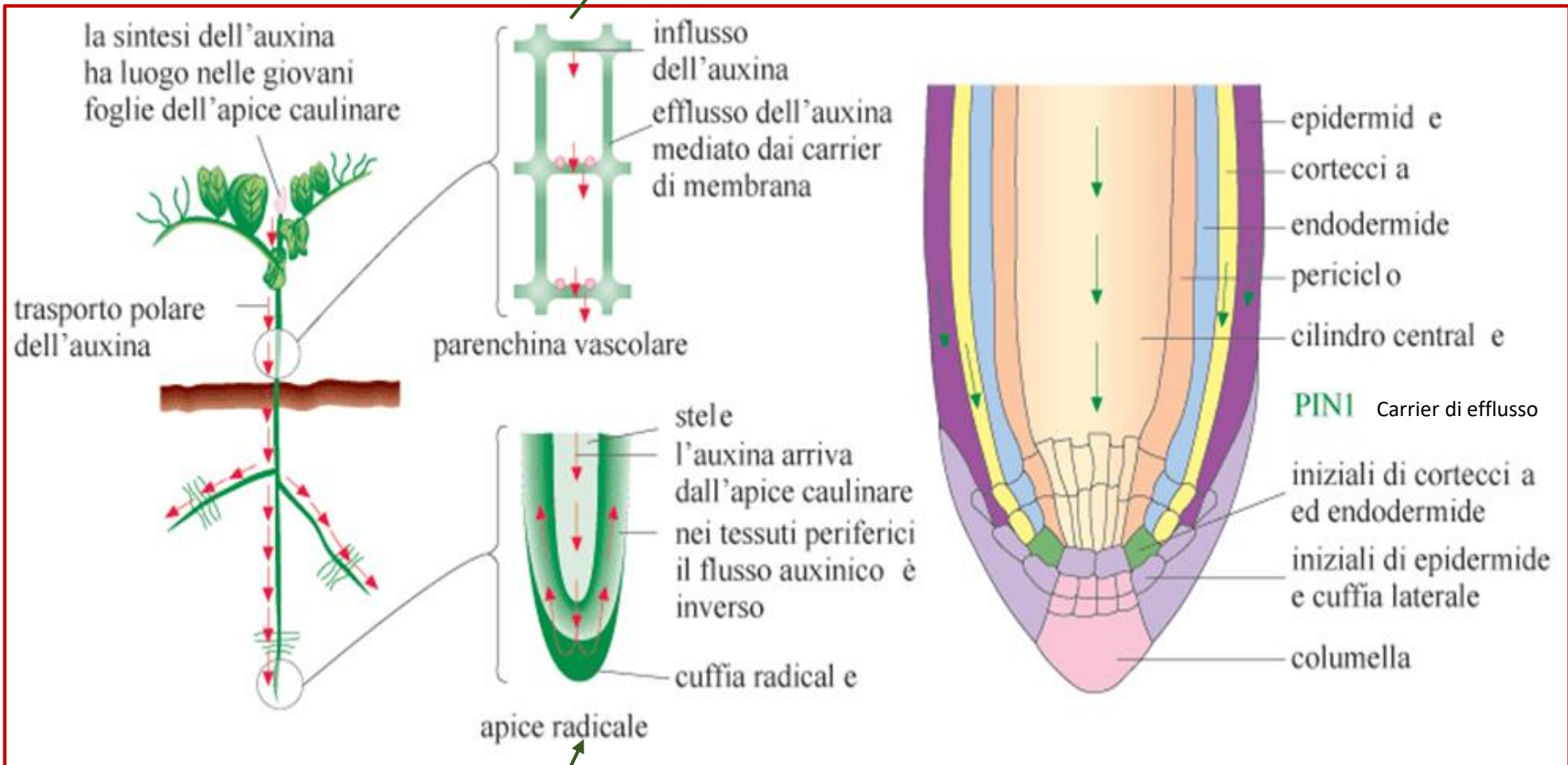
Il trasporto polare dell'auxina è mediato da trasportatori di afflusso (AUX1) e di efflusso (PIN)

- Arrivo all'apice radicale dal germoglio
- Accumulo nel centro quiescente (columella)
- Trasporto in direzione acropeta (epidermide)
- Regolazione del processo di distensione cellulare



Altri ormoni coinvolti nella risposta gravitropica: acido abscissico, brassinosteroidi, etilene, ossido nitrico, citochinine

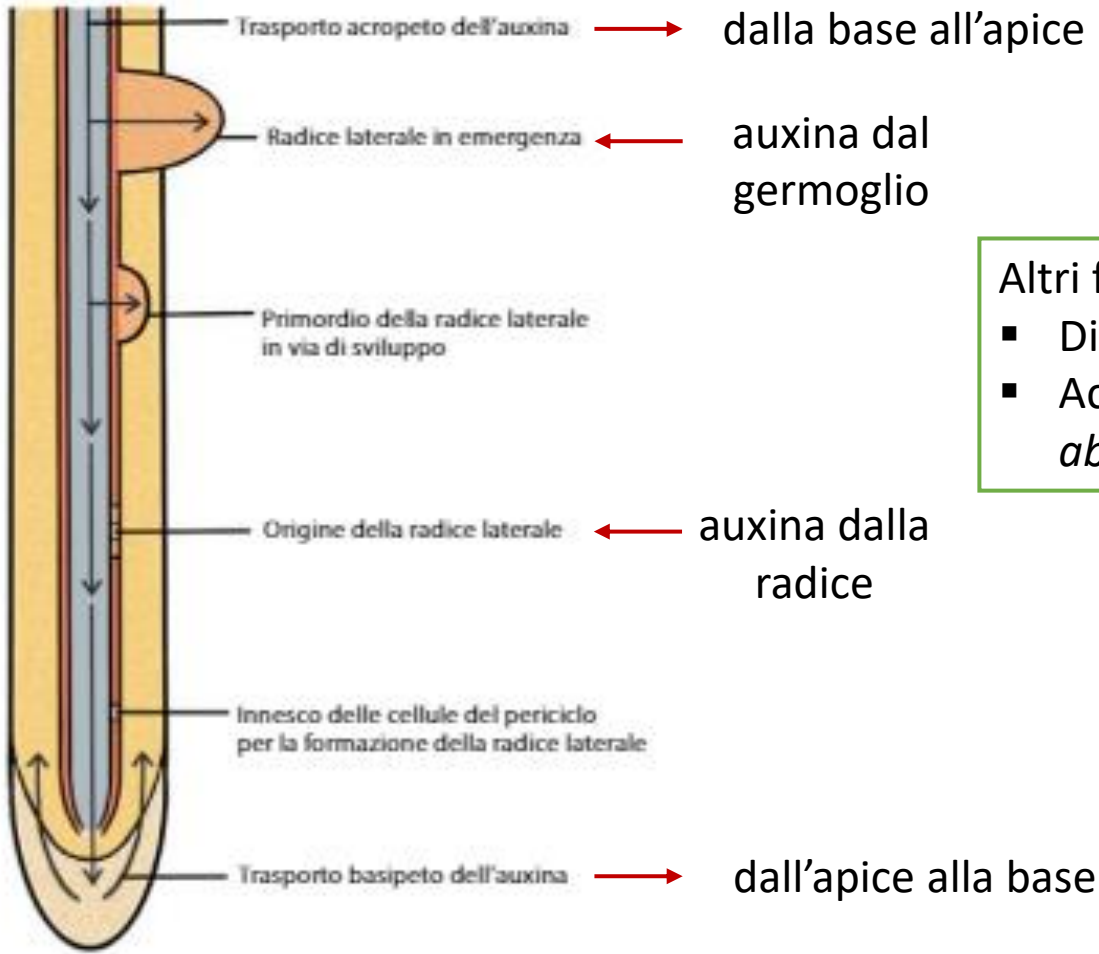
Attraverso le cellule del parenchima vascolare mediante "trasportatori" più numerosi dove c'è lo stimolo di gravità



raggiunto l'apice l'auxina viene ridistribuita e trasportata in direzione acropeta (cambio nello stimolo di gravità)

Controllo ormonale dello sviluppo radicale rapporto citochinina/auxina

Auxina: stimola lo sviluppo delle radici laterali; distensione cellulare



Altri fattori:

- Distanza dall'apice
- Acqua e sostanze nutritive nel terreno:
abbondanti più radici laterali

Impiego dell'auxina esogena per stimolare la produzione di radici avventizie nelle talee

Citochinine: intervengono nella divisione cellulare (citodieresi); si trovano nei tessuti in **continua divisione** dei semi fiori, frutti, apice radicale

Divisione cellulare: la cellula resta meristemica

Distensione cellulare: la cellula si differenzia nel tipo cellulare



Citochinine e Auxina agiscono in modo **ANTAGONISTA** sul mantenimento del meristema dell'apice radicale che si deve dividere e distendere in uguale misura (stessa velocità)

Azione antagonista delle citochinine

- Contrastano l'influenza dell'auxina sulla divisione cellulare (controllo della velocità di divisione e distensione cellulare)
- Contrastano la distribuzione dell'auxina durante lo sviluppo delle radici laterali (regolatore negativo sulle cellule del periciclo)

Auxine

- IAA (acido 3-indolacetico)
- IBA (acido 3-indolbutirrico)
- NAA (acido naftalenacetico)
- 2,4-D (acido 2,4-diclorofenossiacetico)

Alta



Formazione radici



Bassa

- Zeatina**
- 2iP (N-2isopentenil adenina)
- Kinetina** (6-furfuraminopurina)
- BA o BAP** (6-benzilamminopurina)
- TDZ** (thidiazuron)

Citochinine

Bassa

Induzione callo nelle monocotiledoni

Induzione embriogenesi

Radici avventizie da callo

Induzione callo nelle dicotiledoni

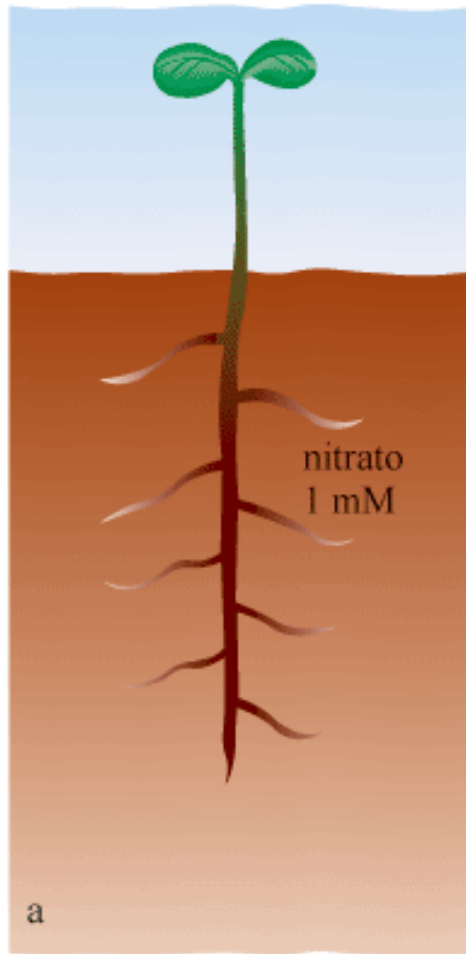
Germogli avventizi

Proliferazione gemme ascellari

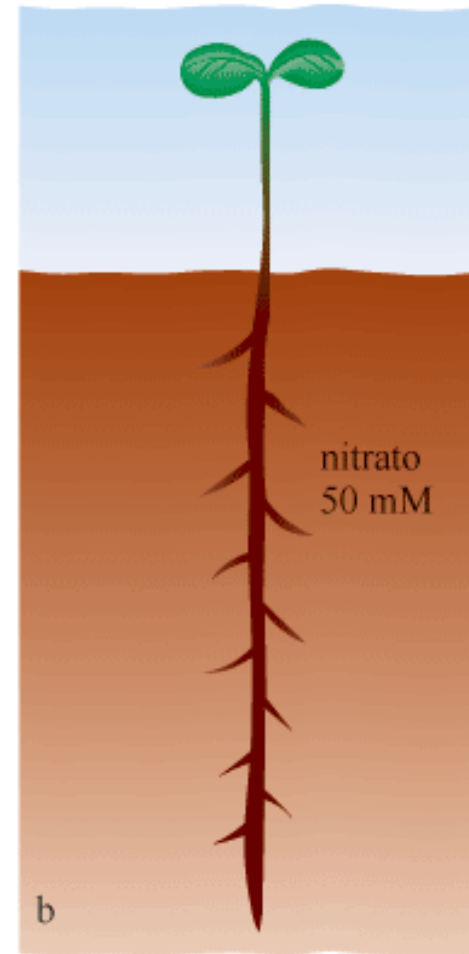


Alta

Influenza di nitrati sullo sviluppo delle radici laterali



Le radici laterali crescono in modo uniforme e cospicuo

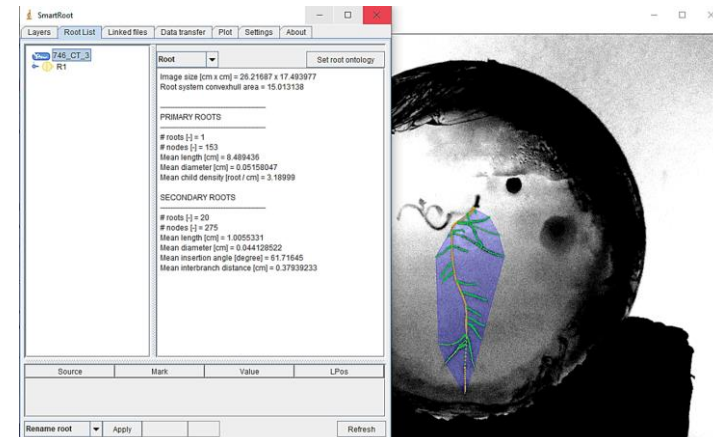
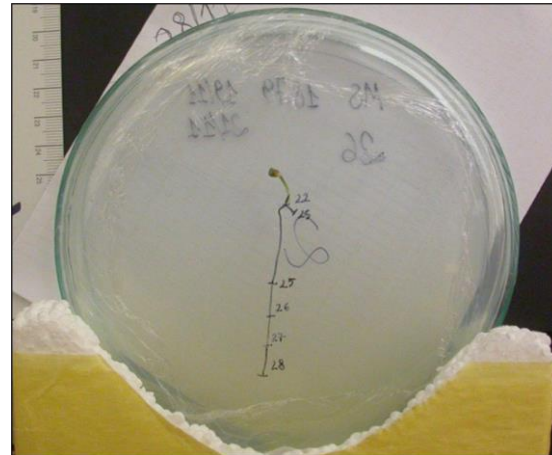
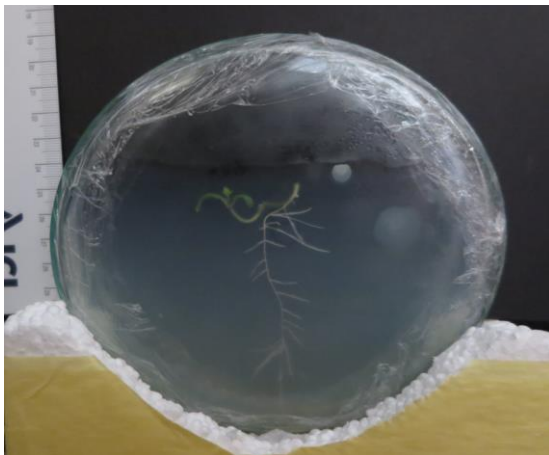


Le radici laterali restano corte mentre la radice primaria si allunga

Studio dell'influenza dell'azoto sullo sviluppo radicale: studio dell'architettura radiale (Sestili et al, in preparazione)

I semi sono stati allevati in piastre Petri in condizione di sterilità con terreno MS modificato con 3 diverse concentrazioni di **AZOTO**

3 genotipi, 3 dosi di azoto, 3 repliche



Elementi nutritivi essenziali per le piante

Elemento	Simbolo chimico	Forma disponibile	Concentrazione nella sostanza secca (mmol/kg)
MACRONUTRIENTI			
Idrogeno	H	H ₂ O	60 000
Carbonio	C	CO ₂	40 000
Ossigeno	O	O ₂	30 000
Azoto	N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1000
Potassio	K	K ⁺	250
Calcio	Ca	Ca ²⁺	125
Magnesio	Mg	Mg ²⁺	80
Fosforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	60
Zolfo	S	SO ₄ ²⁻	30
Silicio*	Si	SiO ₄ ⁴⁻	30
MICRONUTRIENTI			
Cloro	Cl	Cl ⁻	3.0
Boro	B	BO ₃ ³⁻	2.0
Ferro	Fe	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	2.0
Manganese	Mn	Mn ²⁺	1.0
Sodio*	Na	Na ⁺	0.4
Zinco	Zn	Zn ²⁺	0.3
Rame	Cu	Cu ²⁺	0.1
Nichel	Ni	Ni ²⁺	0.05
Molibdeno	Mo	Mo ₄ ²⁻	0.001
(* Sia il silicio che il sodio sono elementi "benefici" essenziali solo per alcuni tipi di piante: il Si per graminacee e pipe- racee, l'Na per le specie "natofile" o "alofite").			

Principali elementi essenziali e alcune loro funzioni biochimiche e fisiologiche

Potassio (K)	È il catione più abbondante della cellula, con una concentrazione citosolica di circa 80-200 mM. È uno dei pochi cationi che non è un componente di strutture organiche. Ha un'importante funzione come osmoregolatore operando, tra l'altro, anche nei movimenti fogliari e nell'apertura e chiusura degli stomi.
Calcio (Ca)	È presente nelle pareti e nei vacuoli; nel citosol è presente solo in concentrazione molto bassa (10^{-7} M). Agisce come secondo messaggero nella trasduzione di segnali ormonali o ambientali. È coinvolto nella regolazione di numerosi enzimi ed è fondamentale nei processi di divisione cellulare.
Magnesio (Mg)	È un costituente dell'anello porfirinico della clorofilla, ed è, inoltre, l'attivatore di molti enzimi e della molecola di ATP.
Fosforo (P)	Sotto forma di fosfato (PO_4^{3-}) è presente in molecole fondamentali quali zuccheri fosfati, nucleotidi, acidi nucleici, coenzimi, fosfolipidi membranali. Ha un ruolo essenziale nelle reazioni in cui è coinvolto l'ATP e gioca quindi un ruolo chiave nella fotosintesi e nella respirazione. È un fattore importante per la regolazione di numerosi enzimi.
Azoto (N)	È un costituente essenziale di amminoacidi, nucleotidi, coenzimi, nonché delle basi azotate del DNA e dell'RNA. È un componente di alcuni lipidi, alcuni zuccheri e della clorofilla.
Zolfo (S)	È un elemento che entra nella molecola di alcuni amminoacidi come cisteina e metionina, di proteine e di molecole importanti, tra cui quelle del coenzima A e del glutatione. È anche costituente delle ferro-zolfo proteine, come la ferredossina, di vitamine e di alcuni solfolipidi di membrana.
Ferro (Fe)	È un costituente del gruppo eme nei citocromi ed è presente in forma non emica nelle proteine Fe-S. È fondamentale in molti processi biochimici come la fotosintesi, la respirazione e la fissazione biologica dell'azoto.
Boro (B)	È richiesto per stabilizzare la struttura delle pareti cellulari e, con un meccanismo non ancora chiarito, regola la divisione e la distensione cellulare.
Rame (Cu)	Funziona come cofattore di molti enzimi redox come la plastocianina e la citocromo c ossidasi. È presente anche negli enzimi ascorbato ossidasi e polifenolo ossidasi e nella superossido dismutasi, che ha l'importante funzione di detossificare il radicale superossido ($O_2^{\cdot-}$).
Manganese (Mn)	La sua funzione più conosciuta e importante è legata alla fotolisi dell' H_2O , che si realizza nel complesso evolvente ossigeno associato al PSII e porta alla liberazione di O_2 . È cofattore di numerosi enzimi, tra i quali decarbossilasi e deidrogenasi. Inoltre, può sostituire il Mg in alcune reazioni enzimatiche che utilizzano l'ATP.
Zinco (Zn)	È un attivatore di numerosi enzimi, tra cui l'alcol deidrogenasi e l'anidasi carbonica. Costituisce le <i>zinc fingers</i> (dita di zinco) di alcune proteine che interagiscono con acidi nucleici.
Molibdeno (Mo)	La sua funzione principale è correlata al metabolismo dell'azoto, in quanto fa parte dei siti attivi della nitrato riduttasi e della nitrogenasi procariotica.