

HOME-PLANTA-MEDI AMBIENT:
UNA HARMONIA TRENCADA
(MODEL D'ESTUDI PLANTA-METALLS PESANTS)

Discurs
que presenta l'Acadèmic numerari electe
Molt Il·lustre Prof. Dr. Joan Barceló i Coll
per ser llegit en l'acte de la seva recepció
el dia 15 d'octubre de 1991

Discurs d'acolliment
de l'Acadèmica emèrita
Molt Il·lustre Prof. Dra. Creu Casas i Sicart

Publicacions
de la Universitat Autònoma de Barcelona
Bellaterra, 1989

ganitzada, per no morir-me dins la meva cara.
Blai Bonet, *Santany*

Ein Faktum unseres Leben gilt nicht insofern es war ist, sondern
insofern es etwas zu bedeuten hat.
Goethe

Llegaron en estas pláticas al pie de una alta montaña, que, casi como
peñón tajado, estaba sola entre otras muchas que la rodeaban.
Corría por su falda un manso arroyuelo, y hacía por toda su
redondez un prado tan verde y vicioso, que daba contento a los ojos
que le miraban.
Había por allí muchos árboles silvestres y algunas plantas y flores,
que hacían el lugar apacible.
Miguel de Cervantes, *Don Quijote de la Mancha*

La science ne consiste pas en faits, mais dans les conséquences,
que l'on tire.
Claude Bernard

A grand and almost untrodden field of inquiry will be opened on
the causes and laws of variation, on correlation, on the effects of
use and disuse, on the direct action of external conditions, and so
forth.
Charles Darwin, *The Origen of Species*

Edició i impressió:
Servei de Publicacions
de la Universitat Autònoma de Barcelona
08193 Bellaterra (Barcelona)

Dipòsit legal: B. 25.635-1991
Printed in Spain

Paraules de salutació	7
Justificació del tema	11
1. Introducció	15
2. Presentació dels components del model	19
2.1. Les plantes, un model i un laboratori bàsics en la cadena de processos de la biosfera	19
2.2. Els metalls pesants, un conjunt heterogeni d'elements químics especialment tòxics per als sistemes vius	21
3. Fenomenologia del model funcional: mecanismes de resposta fisiològica de les plantes	23
3.1. L'arrel, fixació funcional de la planta al medi i porta d'entrada de nutrients i contaminants	23
3.2. La tija, mitjà de comunicació, de distribució i de trànsit entre els òrgans de la planta	27
3.3. Les fulles, centre actiu del metabolisme de la planta	28
3.4. La planta sencera, un model idoni per a l'estudi de la contaminació per culpa dels metalls pesants	31
4. Mecanismes de tolerància de les plantes als metalls pesants	35
4.1. Mecanisme cel·lular de tolerància de les plantes als metalls pesants	36
4.2. Mecanisme de tolerància als metalls pesants en la planta sencera	38
4.3. Mecanisme de tolerància als metalls pesants a nivell de vegetació	40
5. Perspectives de futur i consideracions finals	43
6. Bibliografia	45
Discurs d'acolliment	63

**Excel·lentíssim Senyor President,
Excel·lentíssims i Il·lustríssims Senyors,
Molt Il·lustres Senyors i Senyores Acadèmics,
Senyores i senyors,**

Abans de res, permeteu-me expressar la meva satisfacció i el meu agraïment per haver estat elegit Membre Numerari d'aquesta Reial Acadèmia de Farmàcia de Barcelona.

La forta especialització del coneixement científic i tècnic actual ha creat, molt sovint, una difícil situació d'equilibri entre les necessitats i finalitats de la Universitat (formació científica i humanística, avanç dels coneixements, adequació dels coneixements a les necessitats de la societat, promoció cultural, inquietud intel·lectual, etc.) i les del bon saber i saber fer professionals (aplicació tècnica dels coneixements, utilització de la millor i més adient metodologia per a cada cas concret, «criteri» científic i de judici, i capacitat analítica per a cada un dels processos que engranen la complexitat professional, entre d'altres). D'aquí ve la importància que de bell nou rebrota en el significat d'aquestes Acadèmies. Lluny de la pressió diària de la feina professional, les Acadèmies no han de justificar un «sentit» o una «finalitat» immediata de tot el que fan (un dels mals «unidimensionals» de la nostra societat i de la ciència actual), i gaudeixen d'un conjunt d'experts, molt diversificats per la formació i especialització, que són, alhora, altament qualificats professionalment i científicament. Crec que aquest agregat selectiu pot «polsar» i avivar zones i tendències científiques i culturals, inexplicablement somortes, que difícilment apareixen en el context determinista actual. Per això, altra vegada, rebeu l'agraïment per l'honor d'estar amb vosaltres i participar en aquestes nobles tasques.

D'altra banda, la possibilitat de la meua elecció, com a membre d'aquesta Reial Acadèmia de Farmàcia, en el fons més pregon, ve donada per una cadena de fets que concatenen la personalitat de cadascú. La família, el caràcter o la naturalesa pròpia i l'escola, en tot temps han condicionat, per

bé o per mal, el projecte personal de cada ésser i la seva trajectòria humana i vital, dins de cada «circumstància». En el meu cas, envers la primera (la família) i l'última (l'escola), tinc grans deutes i agraïments. Quant al caràcter, ell forma, explica i determina la trama interna de la nostra conducta i integra la nostra vocació i capacitat d'entendre i de ser, encara que malauradament també ens condiciona els nostres límits, defectes i errors que, amb intel·ligència constructiva, hem de saber assumir amb humilitat.

Les possibilitats per a un vailet que s'anava formant entre els finals dels anys quaranta i dels seixanta no eren molt encoratjadores, atesa l'estretor de les «circumstàncies» polítiques, socials, econòmiques i intel·lectuals del país en aquell temps. Menys encara, si aquesta família gaudia dels mitjans econòmics justos per subsistir materialment. D'aquí ve que tot això, per a mi, tingui uns noms propis ben concrets, que són els que m'han permès d'arribar a ser i d'assolir la meva vocació humana, intel·lectual i científica. L'afecte, la comprensió, l'estímul i el sacrifici dels meus pares, Joan i Victòria, en primer i essencial lloc; dos anys en la disciplina, en l'ordre i en el primer intent de sistematització dels coneixements a mans dels germans gabrielistes de Torroella de Montgrí, i l'àrdua formació d'un batxiller «per lliure», mercès a l'esforçada ajuda i vocació docent del senyor Antoni Vila Gimbernat, mestre —en tot el sentit de la paraula— de l'escola pública de l'Escala, em donaren una sòlida base que, per decisió pròpia i bon consell, em portaren a ser estudiant de la nostra Facultat de Farmàcia a Barcelona, a la promoció 1958-1964. Per a tots ells la meva gratitud i el meu afecte indeleble.

A tot això, per deixar-ho més clar, afegiu-hi el goig inquiet d'un noi tot ulls, sentiment i consciència cap al món que l'envoltava: la dolçor del paisatge i la parla mallorquina de la infantesa en la quietud i el color del camp i del mar balear; el broll juvenil a l'Empordà joiós, en el punt de més desfermada naturalesa (Torroella de Montgrí i, sobretot, l'Escala); i l'obertura cultural i social d'una Barcelona encara abastable, on no sols vaig ser estudiant universitari, sinó també assidu visitant de l'Ateneu, voraç lector de la Biblioteca de Catalunya —sota les voltes silencioses d'aquest noble edifici em vaig capbussar en el món dels clàssics—; entusiasta adelerat del teatre i del cinema; assistent frisós al viver de conferències que ofería la ciutat i, fins i tot, passejant solitari dels seus barris recòndits, plens de color i vida mediterrània...

A la Facultat, durant la carrera, ja se'm va definir netament la meva vocació científica: «què són, com són i quina importància central tenen les plantes.» El professor, doctor Manuel Serrano García va ser el meu mestre. En un món científicament i intel·lectualment tan resclosit en tants d'aspectes, ell va ser —i continua essent— un esperit obert, humà i liberal, tot ell coneixement, estimació i comprensió humana i intel·lectual, amb sentit del mètode i de la mesura. Ell va redefinir les meves, a vegades excessives, inquietuds i em va refermar en la vocació intel·lectual i científica, alhora que aprenia, amb el seu exemple, el que ha de ser un «professor» universitari. A ell també el meu gran agraïment i afecte de deixeble i amic per sempre.

En la vida acadèmica he format part, successivament, del claustre de professors de les Facultats de Farmàcia de les Universitats de Barcelona i Complutense de Madrid, de les quals guardo un gran record i on sempre vaig trobar ajuda i col·laboració entusiasta i generosa; de les Facultats de Ciències de la Universitat de les Illes Balears, on he deixat tants bons amics, i, des de 1982, de la Universitat Autònoma de Barcelona, on actualment s'aplega un actiu i qualificat grup de recerca, que forma el nostre equip.

No és gens d'estrany, doncs, que em trobi ara aquí envoltat tant dels que varen ser els meus mestres a la Facultat, com dels antics companys d'estudis o de claustre, dels meus propis deixebles i col·laboradors i de molts ex-alumnes de diverses promocions. Per a mi és un altre motiu de joia personal i d'agraïment sincer.

Per últim, voldria regradar molt expressament la profesora, doctora Creu Casas i Sicart per la confiança dipositada en la meva persona en presentar-me com a candidat per a la plaça objecte d'aquest discurs i per haver acceptat el discurs d'acolliment. Ella va ser primer professora meua de Botànica a la Facultat. Tots, llavors, encara que estudiants iniciàtics, ja en sabíem i en gaudíem de la seva «dèria», estimació i coneixement per les plantes, sobretot pels briòfits i particularment per les «molses». Més tard, els nostres camins han convergit de nou i hem estat companys de claustre a la Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona. Allà hi té també ella un merescut prestigi per la seva tasca científica i pel seu bon criteri, actiu, madur i comprensiu.

Deixeu-me acabar aquest capítol d'agraïments amb la dedicatòria d'aquest treball d'ingrés a l'Acadèmia, a la meua

muller, doctora Charlotte Poschenrieder, peça clau en la meva navegació humana i científica al llarg d'aquest últims vint anys, en qui, a vegades, és difícil poder esbrinar on acaba un i comença l'altre, tant per la comprensió mútua, com pel grau de maduresa dels seus coneixements. I també el dedico als meus fills, Anna Victòria i Joan, perquè en el futur puguin trobar el plaer i la importància d'entendre i conèixer el món i les persones, perquè trobin sempre l'encert dins l'error i sàpiguen valorar els imponderables que tota trajectòria humana comporta.

A l'hora d'escollir el tema d'aquest discurs em varen sorgir greus dubtes. L'especialització científica comporta grans inconvenients, no només avantatges. Un dels no menys importants és que un pot acabar fàcilment veient-hi només pel reduït forat dels propis coneixements. D'altra banda, si es vol evitar aquesta limitació, l'elecció d'un tema general, més enllà de l'abast personal, pot crear o induir fàcilment un aire de superficialitat, per molt que s'intenti d'esbrinar el millor camí per abastar el tema. Hi perd la complexitat del conjunt. D'altra banda, en la personalitat d'un científic compta molt, o hauria de comptar, no tan sols els coneixements que té —que ha anat assolint al llarg del temps— sinó també, especialment, el rerafons que el lliga a l'experiència personal, el grau de maduresa i complexitat intel·lectual, la visió del món i dels problemes, i la riquesa de registres de la pròpia sensibilitat per percebre l'entorn, sigui aquest el medi físic i biològic (la natura), sigui el conjunt social (poble, ciutat, professió, etc.), sigui simplement humà (la persona i les seves vivències, aspiracions i pulsions).

L'home, amb el seu anhel intern, amb egocentrisme, sempre ha aspirat a entendre la rica diversitat de la naturalesa, que l'alberga, el nodreix i li dona sentit i plaer estètic. Aquestes relacions home-ambient, al llarg dels anys, han anat evolucionant vers un domini cada vegada més absolut de l'home respecte al seu medi natural, i ha format l'espai que avui comprem dins el concepte d'antroposfera. La història de les diverses cultures i el testimoni escrit o gràfic de milers d'escriptors, artistes i pensadors ens parlen ben palesament d'aquestes relacions mútues home-naturalesa. Goethe, Shakespeare, Cervantes, Proust, Joyce, Musil, Mann, Einstein, Darwin, Bacon, Montaigne, Ramon Llull, Joanot Martorell, Josep Pla, entre molts d'altres, en són exemples destacats. El que ha variat en el temps no és l'home, sinó aquestes relacions i formes de domini de l'antroposfera per part de l'home, erigit, ben sovint, de forma artificial i radical, en centre distorsionador. L'evolució tècnica, una excessiva confiança en els límits d'aquest coneixement, i una manca de sentit social i global, al costat de l'esfondrament de l'humanisme, han portat, cada vegada més, a una situació límit, crítica pel que representa d'arbitri qua-

si absolut de la naturalesa. Aquest últim fet, que teòricament no tindria perquè ser negatiu, a la pràctica, malauradament, s'ha mostrat ple de riscos i conseqüències deletèries, per culpa del malgovern individual, social i polític del mateix home. Veiem així que si bé l'home internament no ha variat —i difícilment ho farà en el futur— la seva acció ha fet variar el «paisatge», el món exterior, les característiques del medi ambient que l'envolta. I no sempre per bé (29).

És en aquest context d'acció de les relacions home-medi ambient on portaré avui les consideracions. Per això em serviré d'un model prou fonamental, sensible i delicat, com són les plantes, i d'una «harmonia» ben trencada, com és la relació «home-planta-medi ambient», que té com a centre causal i operatiu l'home i la seva capacitat per entendre, jutjar, fer i desfer en el seu entorn. Em refereixo així, molt específicament, a una malaltia moderna cada vegada més generalitzada per l'acció de l'home, la «contaminació ambiental antropogènica». A més a més, per situar millor i comprendre el tema, he triat els metalls pesants, pel significat tecnològic per a l'home, pel caràcter fortament tòxic, per la no-degradabilitat i per l'afinitat conceptual amb la meua àrea d'experiència científica.

HOME-PLANTA-MEDI AMBIENT: UNA HARMONIA TRENCADA (MODEL D'ESTUDI PLANTA-METALLS PESANTS)

Discurs
que presenta l'Acadèmic numerari electe
Molt Il·lustre Prof. Dr. Joan Barceló i Coll

El dia 17 d'agost de 1771 anotava Josep Priestley (1733-1804), un dels científics més capdavanters del segle XVIII, a la llibreta de laboratori: «Ha estat una sort haver trobat per accident un mètode per restablir l'aire viciat per les espelmes enceses i haver descobert al menys una de les possibles restauracions que la natura usa per aquest propòsit. És la "vegetació"..."» (122).

Encara que aquesta visió inicial de la fotosíntesi per part de Priestley emfasitzava només un determinat aspecte del procés fotosintètic —el que es refereix a la seva participació en la «sanitat ambiental»—, sense poder encara entreveure tota la complexitat i riquesa dels factors i dels processos biofísics, bioquímics i fisiològics que operen en la planta dins d'aquest procés, no hi ha dubte que, transcorreguts ja més de 200 anys d'evolució natural i d'acció directa de la mà de l'home sobre el medi ambient, de nou, en el nostre coneixement actual, i més que mai, adquireix una posició central el valor de les plantes per la sanitat ambiental. I això que només ens referim a la bagatel·la de dos segles!

Les causes i els fets són ben clars. Per la fotosíntesi, les plantes i determinats bacteris, introdueixen i transfereixen l'energia del sol, en forma d'energia química, als éssers vius, biosintetitzant la matèria orgànica, al mateix temps que mantenen la vida i el delicat equilibri metabòlic i funcional del conjunt dels sistemes vius. La planta, a partir d'unes relativament poques molècules inorgàniques (elements minerals i aigua del sòl; CO_2 , i en certs casos N_2 , de l'atmosfera) és capaç d'elaborar la matèria orgànica (sucres, proteïnes, lípids, àcids nucleics, vitamines, etc.), al mateix temps que allibera O_2 a l'atmosfera. Els òrgans especialitzats en aquests processos són, respectivament: l'arrel, per la nutrició mineral i l'absorció de l'aigua, i les fulles (cloroplasts), pel procés fotosintètic.

Un fet que cal destacar és que del centenar d'elements naturals, tan sols aproximadament un 20 % formen l'entrellat intern i possibiliten el funcionalisme dels éssers vius, incloses les plantes (21). Així, la composició de la matèria viva s'ha desenvolupat i ajustat a la química del seu entorn ambien-

tal, ha pres avantatges de les propietats físico-químiques i ha creat un espai de definició i identitat d'un «medi interior» en forta interacció i competició, durant llargs períodes de temps geològic. Aquest fet, lògicament, ha comportat que, en la seva evolució, les plantes hagin desenvolupat mecanismes de selecció activa d'aquells elements que els eren «vitals» i d'estratègies defensives envers l'excés o la toxicitat dels elements. Aquesta regulació del medi intern, o homeòstasi, de les plantes, té unes peculiaritats molt diferenciades respecte d'altres éssers vius, i es caracteritza per la seva gran capacitat de resposta i poder adaptatiu a les condicions canviants del medi.

La rica gamma de processos que ocorren a la biosfera, que en conjunt li donen el làbil i subtil equilibri, des de sempre ha estat molt influïda per l'acció de l'home. Però és sobretot arran de la revolució industrial del segle XIX i, molt especialment, amb el consumisme de l'actual societat tecnològica, quan el desequilibri s'ha fet més agut. El problema és difícil d'esquivar tant en els països desenvolupats, els principals responsables de la desfeta, com en els que encara componen el tercer món, que, en part, en paguen les conseqüències (13, 115).

En el món actual ja es un tòpic habitual i una preocupació general tota una sèrie de fets i situacions relacionades amb el nostre entorn immediat: forat d'ozó a l'estratosfera, inversions tèrmiques, pol·lució aèria per òxids de nitrogen i sofre (NO_x, SO₂, nitrats de peroxiacil, etc.), fotooxidants a l'atmosfera, fugues radioactives o explosions nuclears, armes químiques, contaminació per metalls pesants, pluges àcides, mort dels boscos, deixalles urbanes i industrials, eutrofització de les aigües, contaminació fluvial i marina, degradació dels sòls, pèrdua de la diversitat biològica, efectes tòxics sobre els sistemes vius, degradació dels habitatges i espais urbans, trista degradació de molts paisatges (1, 13, 130), etc.

No és pas estrany que la protecció del medi ambient hagi passat a ser una viva consciència en el món actual. El nostre patrimoni natural, en gran part, està ferit i malalt. L'home en té la culpa fonamental, ensems que la cura. La responsabilitat és inescapable per a nosaltres, no sols per la part que ens toca i per la part de culpa, sinó també, i sobretot, pel futur de les pròximes generacions i per restablir i mantenir una comprensió més humanitzada, a còpia de més natural i plaent, de l'existència. El problema té molts de caires vius,

fora de tot alarmisme, però presents i punyents i amb moltes implicacions: econòmiques, de salut, socials, científiques, tecnològiques, culturals, legals, polítiques, de forma i qualitat de vida (108), etc.

El 21 de novembre de 1990 (94), trenta-dos estats firmen la «Carta de París per una nova Europa», estats de l'oest i de l'est d'Europa, EUA i Canadà, dins del marc de la Conferència per a la Seguretat i la Cooperació a Europa (CSCE). En aquesta carta, els estats signataris, entre ells el nostre, garanteixen una sèrie de drets referents a la persona (llibertat de pensament, de creença, d'expressió; dret a la propietat, a la justícia, etc.) i donen unes pautes de futur. Entre aquestes destaca la consideració sobre el medi ambient, el reconeixement de la urgència a abordar aquest tipus de problemes, compromís per millorar-lo i la prosecució de la tasca exposada en l'informe de la reunió de Sofia sobre protecció del medi ambient. Al mateix temps, es feliciten per la creació de l'Agència Europea del Medi Ambient (EFA). Tot plegat esperem que no sigui una simple declaració de bones intencions, com és tan habitual en el rodatge de la «res publica». En tot cas hi ha la clara constatació d'un fet: la degradació del nostre entorn i la necessitat d'evitar-ho i millorar-ho. Així doncs, crec que científics i polítics hem de saber vetllar i estudiar per poder retornar un millor equilibri entre la rica diversitat de formes de vida i els entorns de la naturalesa, i retrobar la bellesa natural que ens envolta, perquè tots tenim el dret de gaudir-ne, però l'obligació de conservar-la.

2.1. LES PLANTES, UN MODEL I UN LABORATORI BÀSICS EN LA CADENA DE PROCESSOS DE LA BIOSFERA

La posició de les plantes en el medi ambient és bàsica i crítica, perquè ambós formen el punt intermediari i de nexa, i una funció d'acumulació i de reserva, entre la composició química del sòl i la de l'atmosfera. Al mateix temps, les plantes són el nivell tròfic bàsic en la cadena d'aliments (matèria i energia) dels éssers vius. Són doncs els productors primaris que formen i acumulen matèria orgànica i minerals i els subministradors d'O₂ a l'atmosfera. A causa del delicat balanç entre les funcions de les arrels i els intercanvis de gasos atmosfèrics per les fulles, eviten la desertització, estableixen el clima, afavoreixen el reciclatge de la matèria i mantenen l'equilibri de les relacions hídriques en el nostre planeta. A més a més, les plantes són un ric i sofisticat laboratori capaç de produir, de forma suau, eficaç i neta, milers de diferents tipus de productes químics (els productes naturals) de gran aplicació pel profit de l'home (aliments, medicaments, fusta, cautxú, essències, colorants, begudes, verins, etc.) i subministren les fonts fonamentals d'energia (fusta, carbó, petroli, gas natural, etc.).

Aquest paper bàsic de les plantes com a font d'aliments, matèries i energia va impulsar, sobretot a partir dels anys cinquanta, l'anomenada «revolució verda» de l'agricultura. Amb aquest nom s'entén l'impuls donat a l'estudi dels mecanismes i bases científiques que permeten un millor aprofitament de l'agricultura, amb l'increment del rendiment de les collites, amb un ús més racional dels terrenys i amb la millora de la qualitat de la producció vegetal. Aspectes importants d'aquesta revolució verda varen ser l'adobament adient dels camps, la millora genètica de les plantes de conreu, la utilització de plaguicides selectius, l'adequació de les tècniques d'irrigació i de conreu, la mecanització de cultius, etc. No tot va ser positiu en aquesta revolució. L'excés, l'ús indiscriminat, una mala política en la planificació i en l'exigència legal i el desconeixement dels efectes tòxics negatius varen portar a situacions en què, al costat de l'increment dels guanys, es varen introduir, de la mateixa mà

de l'home, importants focus de contaminació química, inclosos els metalls pesants (159). A més a més, avui dia, cada vegada és més difícil augmentar el rendiment de les collites amb aquest tipus de tècniques. La investigació científica actual, més aviat s'orienta en dos altres aspectes: conèixer noves potencialitats genètiques per aplicació de la biotecnologia vegetal i, molt especialment, en l'estudi dels mecanismes i estratègies de les plantes per vèncer o resistir les situacions adverses, per poder així aprofitar al màxim les capacitats adaptadores de cada espècie al seu entorn natural i treure partit dels mecanismes de resposta de les plantes a les cada vegada més diverses i habituals situacions d'estrès ambiental (29, 46, 50, 51). No debades, el dèficit en la producció dels aliments i productes vegetals ve més aviat de les situacions d'estrès a què fàcilment, per diverses causes naturals o artificials, estan sotmeses les plantes (estrès per dèficit o per excés hídric, per temperatures extremes, estrès mineral, iònic o salí, residus tòxics, pol·lució aèria, radioactivitat, UV, etc.) (49, 85, 86, 98, 99, 141, 142, 144). De bell nou, la planta ocupa un lloc bàsic que la situa en un punt clau enfront de la contaminació ambiental, perquè actua, al mateix temps, com a detectora i porta d'entrada i d'acumulació i transferència d'aquesta contaminació.

En aquest sentit, abans de començar a considerar les situacions de toxicitat, és necessari emfasitzar dos aspectes del funcionalisme normal de les plantes, de gran interès per entendre l'optimització de la producció de les collites. La majoria de plantes requereixen un balanç similar de fonts (energia, aigua, nutrients minerals) per mantenir un creixement òptim. No obstant això, els ambients naturals poden diferir bastant en la disponibilitat d'aquestes fonts (48, 74, 77). Així, la intensitat de la llum varia cent vegades des del cobricel al sòl d'una pluviosilva (34); la precipitació anual oscil·la unes 500 vegades (de 10 a 5000 mm/any) dels deserts als boscs tropicals plujosos, i la quantitat de nitrogen disponible per a les plantes varia des de $0,09 \text{ g m}^{-2} \text{ any}^{-1}$ en el desert polar (60) a $22,8 \text{ g m}^{-2} \text{ any}^{-1}$ en un bosc tropical (155). En canvi, les plantes que creixen en aquests diferents ambients, mantenen, dintre d'uns límits estrets de variació, el contingut de carboni orgànic, d'aigua i d'alguns nutrients (48). Aquests nombres ja ens indiquen el grau d'homeòstasi que pot desenvolupar la planta d'una forma natural.

Un altre tret molt característic és la presència quasi constant de les situacions d'estrès en la planta (35). Així, per a

Dudal (61) i Christiansen (51), només el 10% de la terra de conreu es pot considerar com a no-sotmesa a estrès. D'ella, un 20 % està limitada per l'estrès mineral. Clark (52) recalca també la vasta prevalència mundial i l'impacte dels sòls amb problemes de deficiències o toxicitats minerals.

2.2. ELS METALLS PESANTS, UN CONJUNT HETEROGENI D'ELEMENTS QUÍMICS ESPECIALMENT TÒXICS PER ALS SISTEMES VIUS

Normalment, el terme «metall pesant» fa referència a aquells elements químics amb un pes específic més gran de 5 g cm^{-3} o amb nombre atòmic superior a 20 (24). Es tracta doncs d'un conjunt d'elements molt heterogenis que difereixen granment en les propietats químiques i en les funcions biològiques. Entre ells, des del punt de vista dels sistemes vius, s'hi troben nutrients essencials (com el Fe, Mn, Zn, Cu i Mo), elements beneficiosos (Ni, Cr, V, etc.) i elements que, ara com ara, no es considera que tinguin funcions en els organismes vius (Cd, Hg, Pb, Tc, etc.). No obstant això, tots ells, en diferents graus, ja són tòxics en concentracions relativament baixes. L'alumini, encara que pròpiament no entra en aquest concepte anterior, donat que és més «lleuger», per la seva toxicitat s'acostuma a englobar en aquest conjunt.

D'una manera natural, la presència de metalls pesants en quantitats perilloses no sol ser freqüent, si s'exceptuen uns llocs específics amb riquesa de minerals metàl·lics, sòls serpentins i sòls àcids. Malgrat tot, són molt abundants les diferents fonts antropogèniques de metalls pesants, que estan estretament lligades amb el desenvolupament industrial, i generen així una més àmplia extensió del problema. Entre aquestes fonts antropogèniques citem: extraccions mineres, foneries, indústria metal·lúrgica, ús excessiu i indiscriminat de combustibles fòssils, foneries metàl·liques, residus industrials, abocadors urbans, aigües residuals domèstiques, utilització de llots de depuradores per a aplicacions agrícoles, fertilitzants fosfatats, emissions de cotxes, producció de plàstics, pigments, biocides, lubricants, indústries ceràmiques i elèctriques, i producció de ciment. Al mateix temps, l'increment de la pol·lució atmosfèrica, especialment de les «pluges àcides», determina el descens del pH del sòl i allibera els metalls insolubles del sòl amb formes iòniques solubles que són a l'abast de les plantes (62, 66, 129).

De manera general, entre les causes més conegudes de toxicitat dels metalls pesants, podem assenyalar les següents: tendència a acumular-se en els éssers vius, interferència amb els sistemes d'oxidació-reducció, capacitat de formar compostos organometàl·lics amb molècules orgàniques, reaccions de metalls amb lligands com aminoàcids, interacció amb macromolècules tan importants per al metabolisme dels organismes com són les proteïnes (enzims) i els àcids nucleics (informació genètica) i amb lligands units a membranes (compartimentació del metabolisme cel·lular).

A la figura 1, s'hi poden observar valors representatius de la concentració d'alguns metalls pesants (Cd, Zn, Cr, Pb i Cu), als sòls normals i als sòls metal·lífers. Observin com algunes espècies que creixen sobre sòls miners toleren l'acumulació d'altres concentracions de metall, la qual cosa contrasta amb els continguts i límits de toxicitat de les plantes de sòls normals, i ens parla de la rica diversitat de mecanismes de resposta de les plantes.

Figura 1. Concentració d'alguns metalls als sòls i a les plantes.

Lloc de concentració	Cadmi	Zinc	Crom	Plom	Coure
Al sòl normal (ppm)	0.4	40	50	14	30
Al sòl metal·lífer (%)	≤0.035	≤15	≤5	≤5	≤5
A la planta normal, part aèria (ppm)	0.05-0.7	25-150	0.1-5	5-10	5-20
Concentració tòxica crítica a la part aèria d'una planta normal (ppm)	5-30	100-400	5-30	30-300	20-100
Planta acumuladora sobre sòl metal·lífer, part aèria (ppm)*	≤560	≤25000	≤20000	≤11395	≤13700

*Concentracions corresponents a parts aèries de *Thlaspi alpestre* per Cd i Zn, de *Leptospermum scoparium* per Cr, de *Minutaria verna* per Pb i d'*Aeolanthus rosafolius* per Cu.

Hi ha grans diferències en la concentració de metalls entre sòls normals i sòls metal·lífers. Algunes espècies que creixen sobre sòls miners toleren l'acumulació d'altres concentracions de metall, la qual cosa contrasta amb els continguts i límits de toxicitat de les plantes de sòls normals. Els valors per a sòls normals que es donen en aquesta taula es refereixen a concentracions mitjanes a nivell mundial. Els valors per a sòls metal·lífers i plantes acumuladores són concentracions màximes enregistrades en algunes zones. Les concentracions tòxiques crítiques es consideren com a valors indicatius que varien segons l'espècie, la varietat, l'estat de desenvolupament i certs factors ambientals (altres nutrients, subministrament hídric, etc.).

3. FENOMENOLOGIA DEL MODEL FUNCIONAL: MECANISMES DE RESPOSTA FISIOLÒGICA DE LES PLANTES

3.1. L'ARREL, FIXACIÓ FUNCIONAL DE LA PLANTA AL MEDI I PORTA D'ENTRADA DE NUTRIENTS I CONTAMINANTS

En una típica planta superior, l'arrel és l'òrgan d'ancoratge al sòl que, a més a més, assegura la captació d'aigua i d'elements minerals del sòl. L'aigua es difon del sòl a la planta a favor del gradient de potencial hídric. L'absorció dels elements minerals ocorre normalment en forma iònica, bé per un simple procés físic de difusió a favor del gradient o, en molts de casos, la planta requereix un dispendi addicional d'energia que permeti una entrada contragradient. Aquesta absorció activa sol mostrar mecanismes específics de transport a través de membrana. Tot i això, no basta la simple presència en un sòl d'un element perquè pugui ser absorbit per la planta, sinó que l'element ha d'estar disponible, bé en forma dissolta en la solució del sòl, be adsorbit en unió làbil a les micel·les del sòl, la qual cosa permet el seu bescanvi amb altres ions de la solució del sòl o directament amb les superfícies de les arrels. Al contrari, no estan disponibles per a la planta les sals insolubles o els ions fixats estretament a les estructures del sòl. Malgrat que hi ha una absorció selectiva d'uns ions respecte d'altres, la planta normalment capta qualsevol element disponible, sigui essencial, simplement beneficiós o, fins i tot, directament tòxic per a ella.

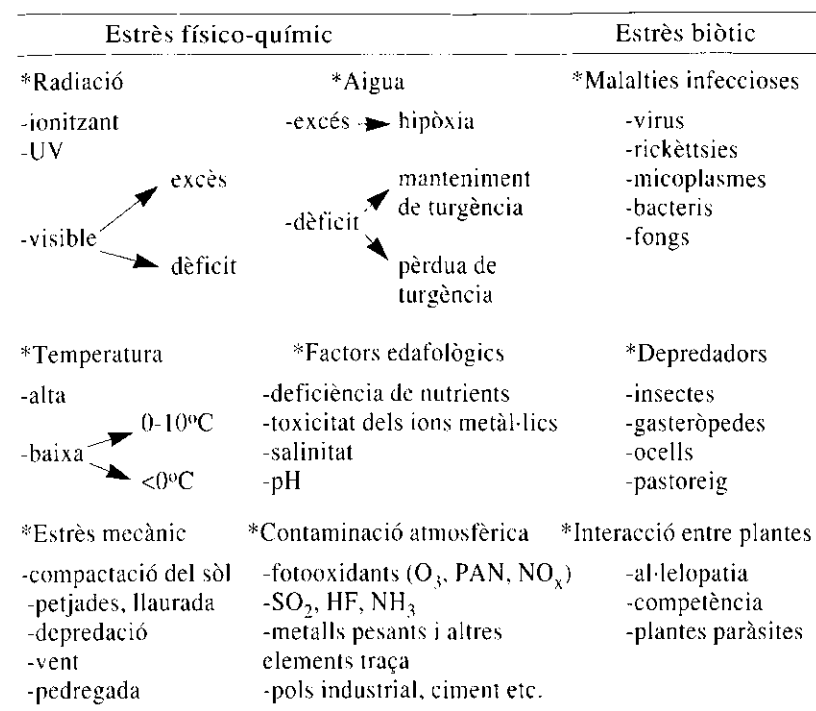
La rizosfera representa l'àrea de les relacions estretes i immediates de l'arrel amb els components del medi (sòl) (101). A la rizosfera, s'hi troba una rica activitat biològica que comporta no sols múltiples processos físico-químics amb els components del sòl, sinó també un intens metabolisme microbià i una forta activitat de les mateixes arrels, i es creen així nombroses interfases en el sistema sòl/arrel que faciliten (i en alguns casos d'estrès poden fins i tot perjudicar) el fenomen de l'absorció. A més a més, les arrels creixen i es renoven contínuament en la zona més apical, en la qual se situen els teixits responsables de la multiplicació cel·lular (meristemes), recoberts per diferents capes de cèl·lules protectores, que constitueixen la còfia. A la part central

d'aquesta última es localitzen els estatocits o cèl·lules especialitzades a determinar la posició de la planta respecte a la gravetat (gravitropisme). Un tret molt distintiu del creixement d'un vegetal és la separació entre el procés de divisió cel·lular (mitosi i citoquinesi) del procés de creixement per elongació o extensió cel·lular. Aquest procés se situa per sobre de la zona meristemàtica i és previ al de la diferenciació cel·lular. En aquest mecanisme, hi juguen un paper central les propietats mecàniques, físico-químiques i bioquímiques de la paret cel·lular, i les condicions osmòtiques de la cèl·lula (vacúol). A més, a les cèl·lules de l'arrel esdevé un metabolisme no lligat normalment a l'activitat directa dels cloroplasts, a causa de la seva naturalesa d'òrgan subterrani no exposat a la llum.

Atesa aquesta rica varietat de processos, no és gens estrany l'interès que actualment desperta la fisiologia de l'arrel (57, 72 157), tant en condicions de nutrició normal, com en les múltiples i diversificades situacions d'estrès a què pot estar sotmesa la planta (157). Pel cas dels metalls pesants, el sòl és el lloc preponderant de contaminació, bé directament, bé per aportació des dels sistemes aquàtics contaminats. En molts casos, a més, la planta rep pol·lució aèria per partícules en suspensió, que també poden ser una font important de metalls pesants, sobretot en algunes àrees amb densitat industrial, urbana, de trànsit, etc.

Les condicions que afavoreixen la captació d'aquests metalls pesants del sòl són tots aquells factors que en faciliten la disponibilitat de la planta. Entre ells són molt importants l'espècie química del metall i el pH del sòl, perquè una acidificació del sòl afavoreix la solubilitat. Aquest és un dels factors de les anomenades «pluges àcides», que són un component important de la síndrome de la «mort dels boscos» (*Waldsterben* o *forest decline*). A causa de la pol·lució per diversos òxids de nitrogen (NO , NO_2 , NO_x) i sofre (SO_2), en presència d'ozó, per les condicions fotooxidants, en l'atmosfera es troben presents una sèrie de substàncies tòxiques (NO_x , SO_2 , PAN, etc.) que donen lloc a la formació de H_2SO_4 i HNO_3 . Aquests àcids, en dipositar-se per arrossegament en el sòl o en un medi aquàtic, baixen molt sensiblement el pH (102, 117) i provoquen l'alliberament d'alguns metalls, que són relativament abundants, però insolubles en condicions més naturals, com és el cas més visible de l'alumini, ió d'una gran toxicitat en aquestes circumstàncies (68, 69, 139, 140).

Figura 2.



Diffícilment es donen en la naturalesa unes condicions òptimes per a les plantes. Aquestes, per la seva fixació al medi i impossibilitat de moure's, es troben sotmeses a molt variats tipus d'estrès, uns naturals, per les condicions climàtiques o la composició del sòl, i altres produïts per l'activitat antropogènica. En l'esquema s'indica una classificació segons el factor causal. En l'estrès químic, els metalls pesants són un dels components més tòxics i durables per a les plantes i altres éssers vius. Hi ha una relació estreta entre els diferents factors d'estrès. Freqüentment aquestes interaccions són sinèrgiques. Un exemple clar d'estrès multifactorial és la «mort dels boscos», en la qual sembla que intervien, al costat de la contaminació atmosfèrica (SO_2 , O_3 , NO_x), factors edafològics, com la deficiència mineral (Mg^{2+}), disminució del pH i toxicitat de l' Al^{3+} , que predisposen a les plantes a una resistència menor davant altres factors d'estrès, com baixes temperatures, infeccions i atacs d'insectes.

A la figura 2, s'hi esquematitzen les diverses possibilitats d'estrès físico-químic i biòtic a què pot estar sotmesa una planta, classificades segons el tipus de factor causal. Vegin el paper central que hi juga l'estrès químic. Cal remarcar, a més, que dintre de l'estrès químic, els metalls pesants són uns dels components més tòxics i duradors per a les plantes i per a la resta d'éssers vius. Observin també el caràcter multifactorial i l'estreta relació entre els diferents factors d'estrès. La «mort dels boscos» és un típic, i per desgràcia

bastant actual, exemple clar d'estrès multifactorial (81, 100, 117), que fonamentalment gravita sobre àrees fortament desenvolupades o és aportat per les condicions climàtiques, per arrossegament, des de regions llunyanes (sobretot, Europa central i del nord, EUA i Canadà).

La capacitat de resposta i d'homeòstasi de les plantes, enfront de la presència de metalls pesants en el medi, és molt diversa. Com discutirem més endavant, en alguns casos el seu mecanisme de protecció és evitar l'absorció de l'ió tòxic, mentre que en altres casos han desenvolupat una tolerància interna respecte del metall tòxic. Com es podria esperar, l'arrel juga papers clau en aquests processos inicials. Com a conseqüència de l'entrada del metall tòxic, el creixement de l'arrel s'afecta granment, i disminueix la relació arrel/part aèria, amb processos de compartimentació del metall que, a nivell cel·lular, és exclòs en part cap a les parets cel·lulars i, més sovint, als vacúols o, fins i tot, és inutilitzat en el mateix citosol. El transport radial del metall tòxic per l'arrel és fortament frenat a l'alçada de l'endodermis. Per tant, de manera bastant general, els metalls pesants s'acumulen en les plantes preferentment a les arrels, i disminueix així el flux cap a la part aèria. No obstant això, hi ha algunes excepcions notables en aquest comportament, com és el cas del tecneci, metall pesant radioactiu, que s'acumula principalment a les fulles (30-33).

Les micorizes (82, 160) són diversos models de simbiosis de fongs amb les arrels. Aquestes associacions beneficioses es troben molt esteses en les diferents espècies de plantes, i se sap que tenen un paper important en la fisiologia de l'arrel per assegurar un balanç hídric equilibrat, i en la nutrició mineral, sobretot del P i dels micronutrients. En una situació d'estrès per metalls pesants són, en part, un factor addicional de protecció i contemperació de la situació crítica (38, 39, 59); però, la mateixa toxicitat pot provocar-ne fàcilment la reducció i disfuncionalitat (158).

A més d'aquests models anteriorment citats, l'arrel també pot fer un paper en la cadena de senyals que regulen a distància les funcions de les plantes. En efecte, hi ha alguns indicis i suggeriments a favor de la participació d'algunes hormones i substàncies de creixement (àcid abscísic, citoquinines, poliamines) com a missatgeres des de la situació inicial d'estrès a l'arrel, fins a les fulles (14, 15, 21, 24, 55, 58, 118).

3.2. LA TIJA, MITJÀ DE COMUNICACIÓ, DE DISTRIBUCIÓ I DE TRÀNSIT ENTRE ELS ÒRGANS DE LA PLANTA

En una planta típica, la tija forma la via d'unió i sosteniment entre l'òrgan subterrani de l'arrel i la part aèria, formada per les fulles, les flors i els fruits. A diferència de l'arrel, en una planta herbàcia la tija és verda, amb una certa capacitat fotosintètica, encara que no tan intensa com en l'òrgan més especialitzat com és la fulla. En l'estructura d'una tija destaca una protecció epidèrmica i un anell de parènquima cortical de cèl·lules especialitzades en funcions metabòliques de reserva i de regulació osmòtica, que envolten la zona pròpia dels teixits conductors, formada per el xilema i el floema. Pel xilema (165) flueixen, des de les arrels a la part aèria, els nutrients i l'aigua, captats per les arrels, i impulsats pel corrent de transpiració i, més secundàriament, per la pressió radicular. El floema, teixit viu funcional de redistribució de les substàncies assimilades (9, 10), forma una rica diversificació de conducció que pot anar tant en sentit ascendent com descendent, tot depèn d'un mecanisme de flux de pressió que es dirigeix des dels llocs de producció als de consum. A cada moment, la seva direccionalitat ve donada per les característiques i la intensitat metabòlica d'ambdós òrgans.

Pel que fa als mecanismes de toxicitat del metall pesant de la planta, s'ha comprovat que la tija no és només una via inerta de transport. En efecte, plantes sotmeses a toxicitat per Cd (21) presenten una menor densitat i desenvolupament dels vasos conductors, al mateix temps que el lumen està obstruït, segons que sembla, per la presència de substàncies del metabolisme fèndic (26). Una conseqüència d'aquest fet és que disminueix el flux de l'aigua cap a les fulles, i hi ha el tancament osmòtic hidropassiu dels estomes, amb la qual cosa, al mateix temps, disminueix el flux de la transpiració. Més difícils són d'interpretar les accions sobre el floema i el sistema parenquimàtic que l'envolta. Les lesions afecten principalment el teixit medullar i els processos de diferenciació dels tubs del xilema (26).

La fulla té funcions centrals en la vida de la planta. És un òrgan que, en l'estructura, està format per teixits externs de protecció (epidermis) i una gran massa central de teixit parenquimàtic (mesòfil) especialitzat en el processos de fotosíntesi. A més, des de la tija, pel pecíol, es prolonga i ramifica en el seu interior una rica venació dels feixos conductors (xilema i floema) que permeten l'intercanvi de substàncies amb la resta de la planta.

A nivell subcel·lular, els cloroplasts són els orgànuls on es realitza la fotosíntesi. Aquest procés requereix CO_2 i H_2O , com a productes primaris, per originar una rica gamma de processos físico-químics (captació i transferència de l'excitació per l'energia de la llum, reaccions fotoquímiques en els fotosistemes, fotòlisi de l' H_2O amb alliberament d' O_2 en el fotosistema II, transducció de l'energia de la llum en una separació de càrregues, processos de transferència d'electrons i de protons, gènesi vectorial d'una força motora de protons (fmp), conversió d'aquesta fmp en energia química de l'ATP i formació del poder reductor del NADPH i de la ferredoxina reduïda, reaccions enzimàtiques del cicle de Calvin, diversos models de carboxilació en plantes C3, C4 i CAM, reducció assimiladora dels nitrats i dels sulfats, assimilació de l'amoni i del sulfur, biosíntesi de lípids, etc.)(11, 12, 73).

Aquesta complexa maquinària estructural i funcional que és la fulla requereix una adequada regulació per evitar excessives pèrdues d'aigua per transpiració, i per assegurar la captació eficient del CO_2 atmosfèric necessari per a la fotosíntesi. La protecció lipídica de l'epidermis (cutícula) i l'especial arquitectura, disposició i regulació dels estomes són els mecanismes bàsics. Veiem així que la fulla és el centre metabòlic i el lloc principal de regulació de l'economia hídrica i d'intercanvi de gasos en les plantes.

La contaminació per metalls pesants, encara que d'una manera més mitigada, des de les arrels arriba també a les fulles. En elles s'observen diverses lesions a nivell estructural, ultraestructural, funcional i enzimàtic (149) que provoca la toxicitat dels metalls. Destaquem sobretot les lesions en els cloroplasts (degeneració del sistema de tilacoides (23, 27, 153); vacuolitització (27); inhibició de la fotòlisi i de

la transferència d'electrons (148); esmortiment de l'activitat de l'enzim, clau d'entrada en el cicle de Calvin, Rubisco (137, 148); inhibició de la biosíntesi de clorofil·les (16, 120), etc. (28, 53, 149, 164).

Els efectes es manifesten ràpidament en la planta, amb l'aparició de taques, clorosi i necrosi (78, 116). Les conseqüències metabòliques van més enllà dels cloroplasts ràpidament, no sols per la seva disfuncionalitat, sinó també perquè es produeix la inhibició del transport de la sacarosa (133), es rebaixen els nivells d'alguns ions essencials (17, 18, 41, 79, 80, 91, 163) i s'altera fortament el metabolisme fenòlic i de les lignines (26, 27, 70, 153, 154).

L'efecte tòxic dels metalls pesants danya també ràpidament les relacions hídriques de la planta, perquè disminueix el contingut hídric relatiu i la transpiració, fonamentalment a causa de la inhibició de l'absorció i translocació de l'aigua. Aquí, a nivell de fulla, hi juga un paper important l'acció dels metalls pesants sobre la regulació de l'obertura dels estomes (24): el cadmi provoca el tancament d'estomes (23, 118) a través de diversos processos (metabolisme hormonal de l'àcid abscísic, citoquinines, mecanisme hidropassi i toxicitat directa sobre les membranes). Les plantes afectades per la toxicitat del Cd són menys resistents a l'estrès per dèficit hídric, principalment a causa de la major rigidesa de les seves parets cel·lulars (22, 23); al contrari del que succeix en el cas del Cr, que incrementa l'elasticitat de les parets cel·lulars i afavoreix així la resistència a l'estrès hídric de la planta (19, 20).

Un altre aspecte important del metabolisme de les plantes sotmeses a l'acció tòxica dels metalls pesants és que aquests porten fàcilment cap a una acceleració dels processos de senescència i d'abscisió. Així, plantes de *Phaseolus vulgaris* tractades amb Cd mostren, a nivell ultraestructural, un estímul en la conversió de les cèl·lules corticals, veïnes als teixits vasculars dels pulvínuls de les fulles, a les cèl·lules de la zona d'abscisió (154). En aquest cas ens trobem amb un típic exemple d'acció dels metalls pesants, que modifiquen la pauta i la intensitat de la diferenciació cel·lular.

La figura 3 mostra els diversos llocs on es localitzen més habitualment, i l'acció dels metalls pesants a nivell subcel·lular. La figura 4 resumeix alguns dels efectes tòxics més destacats, provocats pels metalls pesants a les cèl·lules vegetals. No s'hi indiquen els efectes a nivell genètic, perquè encara són poc coneguts.

Figura 3.

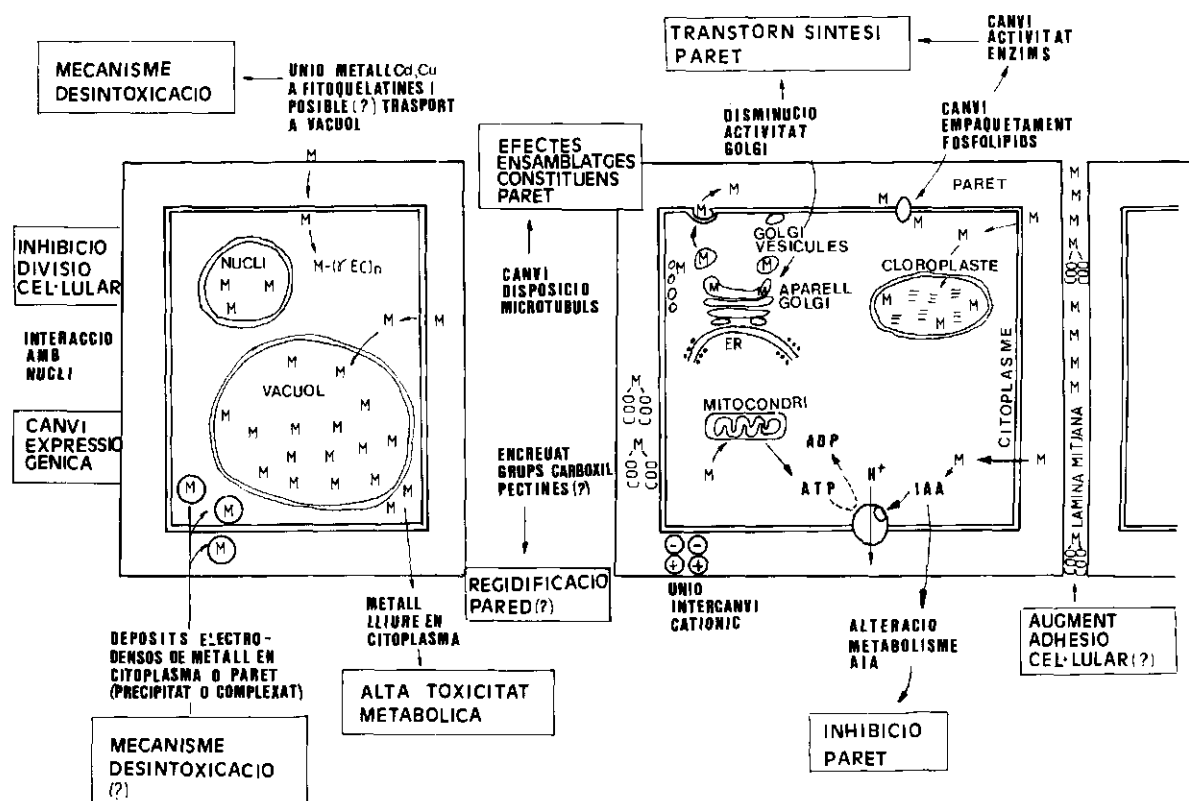
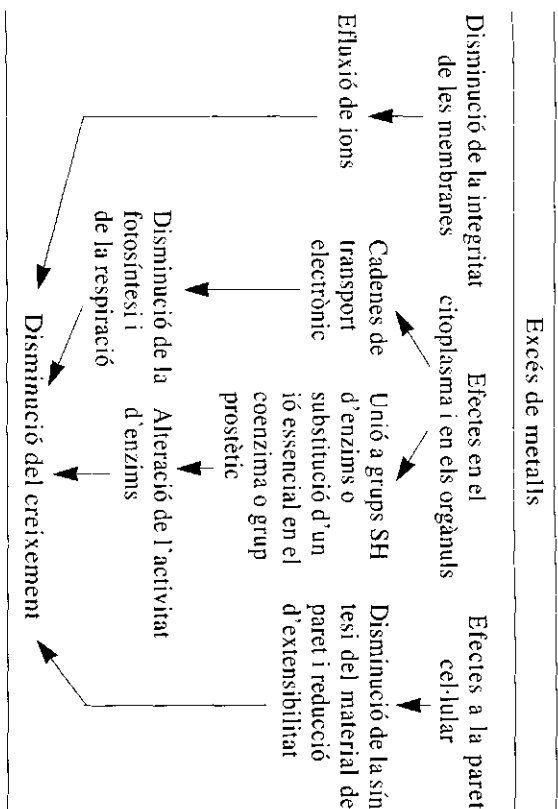


Figura 4. Alguns dels possibles efectes tòxics per culpa d'un excés de metalls pesants en la cèl·lula vegetal.



3.4. LA PLANTA SENCERA, UN MODEL IDONI PER A L'ESTUDI DE LA CONTAMINACIÓ PER CULPA DELS METALLS PESANTS

Tot i la intensa investigació en aquests últims decennis, encara desconeixem els mecanismes bàsics que provoquen la toxicitat dels metalls pesants en els sistemes vius. La diversitat de propietats físico-químiques dels diferents elements químics, inclosos en el concepte de metall pesant, i la gran varietat d'efectes tòxics i metabòlics que produeixen, fan pensar que difícilment tots ells actuen amb el mateix mecanisme. En tot cas, a nivell molecular i cel·lular, s'observen aviat lesions que indiquen que el material genètic i les biomembranes són els centres primaris de l'impacte causat pel metall tòxic (55, 56, 83). Com a conseqüència d'aquest fet, es pot produir, secundàriament, tota una cadena de canvis metabòlics en els diferents compartiments subcel·lulars, els quals, a través del desequilibri dels nutrients i assimilats, i mitjançant les hormones, alteren fàcilment la complexa xarxa de funcions interconectades, que són característiques d'un ésser viu superior (14, 15, 36, 47, 118, 119, 145, 147, 150, 151, 164).

Per esguard del que hem tractat anteriorment, podem veure com la planta és un material molt idoni per a aquest tipus d'estudis. Es tracta d'un organisme eucariota superior, que va equipat amb un ric metabolisme autotròfic; està dotat d'un sistema ben definit de regulació contínua del creixement (per divisió cel·lular i per creixement en extensió); gaudeix del característic sistema de parets cel·lulars, que permet explicar i seguir físicament el creixement cel·lular en extensió, i, a més a més, el conjunt de característiques de la paret cel·lular, el vacúol i les propietats funcionals del tonoplast, permeten un fi ajust osmòtic, en resposta a les variacions del medi exterior.

A més d'això, la planta com a tot unitari, a diferència de l'animal o del microorganisme, és un sistema ancorat, fixat rígidament al medi terrestre que l'envolta, al sòl i a l'atmosfera, i aquesta obligada immobilitat, li limita considerablement el poder explorador i prospectiu i la priva de poder fugir de situacions crítiques, intemperants o adverses. En contrapartida, l'organització estructural i funcional la fa molt oberta a l'intercanvi, efectiu i conservador, de matèria, energia i informació des del medi. Tots aquests fets han determinat una evolució caracteritzada per una gran flexibilitat d'adaptació i plasticitat de respostes. En tot cas, s'ha de tenir també en compte que les plantes són el nivell bàsic de les cadenes tròfiques dels sistemes vius, i per tant, també són receptors, acumuladors i transferidors importants de toxicitat.

En el conjunt de la planta com a model d'estudi, l'arrel, exceptuant parcialment la pol·lució atmosfèrica, representa l'òrgan receptor i acumulador primari, que disposa de mecanismes bàsics d'exclusió o de tolerància interna, com tractarem més endavant. La part aèria presenta una ordenació més complexa de processos. En ella, la tija li assegura el flux i la distribució dels nutrients i assimilats, i dels senyals informatius de regulació entre les parts funcionals del conjunt (àcid abscísic, citoquinines, etilè, àcid indolacètic, poliamines) (14, 23, 58, 118). Els canvis metabòlics de les fulles sembla que provenen de l'acció tòxica sobre les membranes i de canvis en els processos de diferenciació cel·lular (26, 154).

Disposem així d'un sistema viu, dòcil i sofert, amb capacitat de resposta ràpida i diversificada, que en els seus mecanismes bàsics pot explicar-se primàriament per l'expressió gènica, pels diferents sistemes de membranes o per les

propietats de la paret cel·lular (figura 3). A partir d'aquest primer impacte es disparen una sèrie complexa d'efectes secundaris (figura 4). Aquestes respostes de les plantes tendeixen, en general, a adoptar un sentit conservador, que inclou compartimentacions dels metalls tòxics i exclusions de les parts fràgils danyades, per modificació de la competència cel·lular; canvi de la pauta de diferenciació, que comporta una estimulació de processos de senescència i abscisió (154), i canvis interns, que afavoreixen un ajustament osmòtic i una redistribució metabòlica. Pel que fa a aquesta enrevessada trama de processos de regulació i d'ajustament, la planta és única, entre els eucariotes, a causa de la riquesa de desplegament de mecanismes de resistència o de tolerància interna.

Acabem de veure el valor de les plantes com a model central d'estudi, a causa de la seva sensibilitat i del tipus de nutrició mineral, no sols com a porta principal d'entrada dels metalls tòxics a la biomassa, sinó també com a bioindicators i laboratori d'assaig de les reaccions i respostes biològiques que provoquen aquests metalls. Un tret molt distintiu és l'aparent inespecificitat de moltes respostes biològiques i la dificultat de destriar entre les accions primàries, més específicament responsables del mecanisme d'interferència, i la multitud d'accions secundàries, que més que causades per la toxicitat directa del metall, poden ser, més aviat, conseqüències de les disfuncions causades per ells: canvi de permeabilitat de les membranes, que porten a desequilibris en l'economia hídrica i en el balanç iònic; alteracions de la regulació metabòlica; desequilibris hormonal; etc.

Aquesta diversitat fisiològica i bioquímica no és exclusiva només de les respostes de les plantes als metalls pesants, sinó que també es manifesta per fortes diferències en el grau de sensibilitat a la toxicitat i al tipus de respostes. En aquest cas la planta ens ofereix un model ben útil d'estudi. La fixació al medi, tan característica de la planta superior terrestre, ha portat, al llarg de l'evolució i amb diversos models, a fornir-se de mecanismes elaborats i diversificats d'adaptació, que mostren un sistema molt flexible i de gran plasticitat (21).

Per considerar totes les potencialitats d'aquest sistema adaptatiu de les plantes cal incidir en el problema a diversos nivells: 1) cel·lular, 2) planta sencera o organisme i 3) vegetació. D'entrada, amb caràcter general, assenyalem que en la literatura específica, alguns autors acostumen a distingir entre les respostes a curt termini o aclimatació, (3) i les a llarg termini o adaptacions. Al mateix temps hi ha dos grans mecanismes que poden actuar: i) que la planta eviti l'absorció del metall o l'exclogui, o ii) que la planta toleri el metall.

Hem vist anteriorment que un tret molt característic de les plantes respecte dels animals és l'alt grau de dependència directa del medi. Aquest fet ha determinat una evolució molt conservadora de les seves necessitats internes, molt diversificada en els tipus de respostes i molt plàstica en la seva adaptabilitat: des de simples manifestacions fenotípiques a variacions o regulacions del sistema genètic.

Una cèl·lula vegetal eucariota típica mostra un territori cel·lular protegit o «cuirassat» per la paret cel·lular i una presència molt destacada del vacúol, a part del metabolisme específic propi del cloroplast, per resaltar-ne només alguns dels trets més distintius. Doncs bé, aquestes peculiaritats fan un paper important a l'hora de considerar els mecanismes de tolerància de les plantes.

En el coneixement científic actual, l'estructura i funció de les membranes (9, 96) mostren una fina ordenació molecular capaç de captar selectivament unes substàncies en comptes d'altres; de rebre, transduir i amplificar senyals; de regular vectorialment el flux i la concentració de les diverses substàncies mitjançant sistemes de bombes i transportadors; de posseir canals iònics específics amb «portes» de regulació fisiològica del flux, i de gaudir d'una complexa ordenació de potencials de membrana, entre altres característiques. En aquest context, són bàsiques les bombes electrogèniques de protons (ATPases i pirofosfateses translocadores d'H⁺ que mantenen un pH citosòlic quasi neutre i molt ben definit, al mateix temps que acidifiquen el medi extern de la paret cel·lular i del contingut vacuolar, o els gradients de pH intern que es generen entre els espais intratilacoïdals —o intermembrana— i l'estroma del cloroplast —o la matriu de la mitocondria). Els potencials electroquímics subministren la base energètica pels processos actius que requereixen aquesta energia per vèncer el contragradient, inclosos els de transport actiu dels ions.

Les característiques de ió metàl·lic amb càrrega i la gran variabilitat d'estats d'oxidació-reducció que mostren molts dels metalls pesants, ja ens poden fer entreveure que, potencialment, presenten dos llocs d'acció primària: les membranes i l'expressió gènica, sigui la típicament nuclear, com la més compartimentitzada del cloroplast, sigui la mi-

tocondria. Abans ja hem dit que un dels possibles mecanismes de defensa de la planta enfront de metalls tòxics és per «evitació» d'absorció. Sembla que aquest no és un mecanisme molt general de la planta. Un segon tret que cal destacar és que, donada la gran diversitat de propietats físico-químiques dels nombrosos metalls pesants, el caracter essencial d'alguns d'ells, —simplement beneficis d'altres—, i la toxicitat de la resta o de tots —a partir de certes concentracions crítiques—, també com era el cas de les respostes fisiològiques, variaran, a causa dels diferents elements metàl·lics, els models de «protecció» o de resistència a la toxicitat (104).

Entre els elements metàl·lics potencialment més tòxics, i per tant més preocupants, hi ha Hg, Al, Cu i Cd. Algunes plantes han elaborat mecanismes interns de tolerància al metall tòxic, que passen, en diferent grau de significació segons l'element i planta, per la regulació subcel·lular per compartimentació vacuolar, exclusió a la paret cel·lular o insolubilització o seqüestració en el mateix citosol. En aquests mecanismes hi ha una interacció i variació clara de les propietats selectives de les membranes. En molts casos, s'hi afegeix un increment de determinats àcids orgànics (àcids màlic, cítric, isocítric, oxàlic, succínic, etc.), els quals, a causa dels seus grups carboxils, actuen com a complexants dels metalls. El Zn i l'Al són els models més estudiats en aquest sentit (42, 64, 65, 106, 131, 132, 138).

El descobriment de les metal·lotioneïnes animals (105) —proteïnes de baix pes molecular, riques en cisteïna— amb propietats quelants per als metalls pesants, va fer pensar en la possible funció protectora d'aquests tipus de proteïnes per la toxicitat interna dels metalls pesants, també en el cas de les plantes. Sembla que no hi ha, en el cas de les plantes, una acceptació general sobre la seva presència i funció. Més recentment (75, 76, 11, 123, 135), s'ha descobert la presència a les plantes d'uns pèptids més simples, encara que semblants a les metal·lotioneïnes animals. Són les fitoquelatines. Després de la indecisió inicial hom les sol incloure en un grup més dintre del general de les metal·lotioneïnes. D'acord amb aquesta visió (67) tenim tres classes de metal·lotioneïnes (Mt):

Classe I: proteïnes en què la cisteïna es localitza com la Mt renal equina (per exemple, *Neurospora crassa* (97), *Agaricus bisporus* (110).

Clase II: proteïnes en que la cisteïna es localitza amb poca relació amb la Mt renal equina (per exemple, *Saccharomyces cerevisiae* (161), la cianobactèria *Synechococcus* TX-20 (113)).

Clase III: metal·lotiolat polipèptids sintetitzats sense traducció (per exemple, *Schizosaccharomyces pombe* (93, 111), plantes superiors (76, 88), algues eucariotes (71)).

Només en el cas de la clase III —fitoquelatines, cadistines o poli(gamma-glutamilcisteinil)glicina— sembla que hi ha proves conclusives en les plantes. La diferència més important entre les fitoquelatines i les típiques metal·lotioneïnes rau en la menor complexitat de les primeres i en la no-aparent codificació gènica, sinó al contrari, hom les considera metabòlits secundaris de les plantes. Les fitoquelatines i, en general, les metal·lotioneïnes ofereixen un interessant camp d'estudi dels aspectes moleculars dels mecanismes de defensa de les plantes i, en part, expliquen la tolerància interna que mostren algunes plantes a la toxicitat per determinats metalls pesants (123). Entre la diversitat de funcions en què podrien estar implicades, cal destacar la seva possible participació en el transvasament citosol-vacuòl (128) i en la participació, com a intermediàries, en el metabolisme de la reducció assimiladora del sofre en les plantes (136).

Lligats amb les membranes, també s'han descrit altres possibles mecanismes de tolerància (56) que passarien per una alteració de les propietats electrofisiològiques de les membranes, a causa de l'acumulació de l'ió tòxic, amb mecanismes d'evacuació cap a l'exterior del metall lesiu, i se servaria així l'espai intern del citosol i el sistema d'òrgànuls.

4.2. MECANISME DE TOLERÀNCIA ALS METALLS PESANTS EN PLANTA SENCERA

La finalitat d'un fisiòleg, a l'hora d'entendre un procés o la resposta d'una planta vers qualsevol factor, és considerarla com un organisme sencer, de respostes integrades, i aclarir-ne els mecanismes interns de coordinació del conjunt. Al costat de les observacions de les respostes hi haurà els llocs on succeeix i la interpretació dels mecanismes de resistència o tolerància de la planta a la toxicitat d'aquests metalls.

Per la majoria dels metalls, l'arrel és l'òrgan d'entrada i d'acumulació. Hi ha respostes diferenciades a nivell dels diferents territoris cel·lulars. Alguns elements, com l'alumini, sembla que impedeixen ràpidament el creixement cel·lular per divisió (68). Altres, com el Cd o el Zn, més aviat destorben el creixement per extensió cel·lular (20, 22, 118).

Potser un punt central a l'hora de considerar, en aquest nivell, el mecanisme de tolerància és la seva interferència amb la diferenciació cel·lular. Aquest fet, el podem observar ben visiblement en el desenvolupament i obstrucció del sistema vascular (26). L'endodermis és una altra barrera natural que serveix de filtre efectiu. En tot cas, no és un mecanisme general, ja que alguns elements metàl·lics —com el tecneci-99 (metall pesant radioactiu, però inicialment més quimi tòxic que per l'acció de la radiació β que emet (25, 30, 31, 32, 33, 152)—, al contrari, s'acumulen preferentment a les fulles, tot i que les arrels els absorbeixen.

Sembla doncs molt lògic, no sols considerar la importància de l'element, sinó també el tipus d'«espècie» química, tant per l'absorció de l'ió, com pel seu comportament intern i pel mecanisme de defensa de la planta. Així, en part, s'explicaria que la majoria dels ions metàl·lics, en ser cations, actuen ràpidament en el lloc d'entrada i al llarg del camí, mentre que altres metalls absorbits i transportats internament com anions (el pertecnetat TcO_4^- , en el cas del Tc) no puguin ser «reconeguts» tan aviat i s'acumulin més amunt, en el seu lloc d'acció quimi tòxica, a les fulles, on interfereixen, molt probablement, el metabolisme fotosintètic de reducció assimiladora dels sulfats de les plantes (33, 152).

Un dels efectes més característics dels metalls pesants sobre les plantes és l'estímul de la senescència i l'abscisió de les fulles. La seva acció s'exerceix mitjançant canvis en el model de diferenciació cel·lular, que provoca la inducció de la formació d'una capa d'abscisió cel·lular. A nivell de planta, aquest mecanisme es pot interpretar no sols com a una simple acceleració de processos degradadors, deguda a una cadena de fets negatius en el funcionalisme de la planta (canvi de permeabilitat de les membranes, desequilibri dels nutrients, pèrdua de la coordinació cel·lular i intercel·lular, etc.), sinó també com a una complexa estratègia selectiva de defensa de les situacions internes crítiques de toxicitat per culpa dels metalls pesants.

Quant a la planta sencera, també sembla significatiu el mecanisme de regulació interna del valor conservador de l'economia hídrica a través del reglatge del grau d'obertura dels estomes (20, 23, 118), fet que, en alguns casos, fins i tot pot anar unit a una certa capacitat d'ajust osmòtic més general.

La rizosfera és un espai molt ric en interaccions de la fisiologia global de la planta. Cal no oblidar, en aquest nivell, com és d'útil en els mecanismes de tolerància de la planta (41). L'arrel pot ser activa, en aquest sentit, des de diversos mecanismes (157). Entre ells destaquem l'exsudació de lligands quelats de les arrels cap al sòl. D'aquesta manera, les plantes poden reduir l'activitat dels ions metàl·lics lliures del sòl (56). Molt característic de gran part d'aquests metalls és el seu poder d'oxidació-reducció, que afecta la seva absorció. Així, les formes reduïdes de ferro i manganès (Fe^{2+} i Mn^{2+}) són molt més solubles i disponibles per a la planta que les formes oxidades (Fe^{3+} i Mn^{4+}). La defensa de la planta enfront de l'excés pernicios, en aquest cas, pot venir per difusió d' O_2 des de l'arrel (4), o per immobilització en la rizosfera directament pel potencial d'oxidació segregat per la planta. Una altra interacció central és el pH de la rizosfera i l'especiación de l'ió metàl·lic en relació amb el mecanisme de tolerància. Aquest cas és especialment destacable per l'alumini i el Fe^{3+} , donat que, en augmentar el pH, aquests metalls formen una sèrie de productes monomèrics d'hidròlisi (156). Un últim mecanisme d'exclusió en la rizosfera és per immobilització dels metalls a les parets cel·lulars (84), o per seqüestració de l'ió metàl·lic en els mucíl·lags de l'arrel (87) o, fins i tot, per la pròpia exsudació de la cal·losa per part de la planta (162).

4.3. MECANISME DE TOLERÀNCIA ALS METALLS PESANTS A NIVELL DE VEGETACIÓ

Aquest és un camp d'enorme interès actual. Cal destacar el coneixement de diferents graus de sensibilitat i tolerància de les plantes a la toxicitat per metalls pesants, no solament entre les diverses espècies, sinó per la possibilitat d'existència o no d'ecotipus. En l'evolució de la tolerància de les poblacions de la vegetació d'una àrea, indubtablement sempre hi ha un component genètic, tant pel que fa a les respostes ràpides, per regulació diferencial de l'ex-

pressió gènica, com si es considera en l'escala àmplia del temps. El fet de disposar d'enclavaments de diverses mines, riques en metalls d'aquest tipus, pràcticament no tocades des d'èpoques pretèrites, sobretot les romanes de fa uns 1500 anys, ha permès d'estudiar i seguir el grau de selecció i adaptació de la vegetació al llarg del temps. El mateix passa, més modernament, amb mines, foneries o llocs de deposició de residus abundants, sotmesos a una regeneració natural.

Les metal·lofites —plantes adaptades als sòls rics en metalls pesants— són objecte d'una atenció particular, ja que el seu estudi pot aportar coneixements sobre els mecanismes naturals que són a la base de les adaptacions d'aquestes plantes a l'estrès químic per metalls pesants. Prosperen als sòls serpentins i als terrenys d'explotació minera. Als sòls serpentins, les plantes no tolerants mostren una productivitat molt baixa, perquè contenen ben pocs nutrients —especialment N, P i K—, una proporció descompensada de la relació Ca/Mg, amb descens del Ca respecte del Mg, i un alt contingut de determinats metalls pesants —Ni, Cr o Co (92).

Un tret molt distintiu de com ha evolucionat la tolerància de les plantes als metalls pesants és que, en alguns casos, pot ser un procés ràpid (6, 8, 89, 114, 134, 143). Aquest fet obre importants perspectives de futur aprofitament, si tenim en compte el creixent increment de nous llocs de contaminació antropogènica (minerries, metal·lúrgia, foneries, biocides, residus urbans, fangs de depuradores i productes de combustió industrial i del trànsit).

En els casos en què les plantes colonitzen terrenys rics en metalls pesants durant milers d'anys, s'hi ha comprovat que conviuen plantes endèmiques i altres de procedència externa. La interpretació dels fets és unànime, encara que s'admet la possible existència de paleoendemismes (espècies relictas, abans d'àmplia distribució i ara restringides a determinades àrees) i neoendemismes (espècies originades en algunes àrees en resposta a determinades condicions medioambientals (21).

Moltes plantes actuen com a hiperacumuladors de metall pesant. És el cas, per exemple, del Ni en els sòls serpentins. Podem citar l'*Alyssum bertolonii* Desv. (Itàlia) (44, 100); algunes subespècies de *Thlaspi alpinum* Crantz (124) a l'Europa Central, i *Sebertia accuminata* Pierre a Nova Caledònia

(90), entre altres. *Thlaspi* també és hiperacumulador d'altres metalls pesants, com el Zn (*Thlaspi calaminare* Lej.) (124) o el Pb (*Thlaspi rotundifolium* L. Gaudin ssp. *cepa-eifolium* —Wulf.— Rouy et Fouc.) (125). Els avenços en aquest camp ja han permès una abundant tabulació d'espècies hiperacumuladores (7).

Algunes espècies són de gran utilitat com a bioindicadors (43), perquè retenen selectivament un metall pesant i permeten així de veure'n la presència en un sòl. Citem *Polycarpaea spirostyles* i *Becium homblei* (127) pel Cu, *Viola calaminaria* (63) pel Zn, *Eriogonium ovalifolium* per l'Ag i espècies d'*Alyssum* pel Ni (126). Destaquem també que les molses i els líquens, per la seva peculiar biologia, actuen com a veritables embornals de la contaminació per metalls pesants (45, 121).

La base genètica d'aquesta tolerància sembla que depèn d'un nombre de gens amb caràcter additiu i dominant (5, 40, 52, 64, 103, 107). Les primeres visions consideraven que la tolerància a un metall no en conferia a un altre. El nostre coneixement actual ja és més complex. Als sòls contaminats amb diferents metalls pesants, s'hi ha comprovat que les plantes poden presentar una tolerància múltiple, encara que només en alguns casos s'ha observat cotolerància (tolerància a un metall no present induïda per un altre de present). Cox i Hutchinson (54) varen trobar cotolerància al Cu i Ni a la *Deschampsia caespitosa* de Sudbury, al Canadà, i Allen i Sheppard (2) pel Zn i Pb al *Minulus guttatus*, tolerant al Cu.

En tot cas, en acabar aquesta exposició i abans de passar a les consideracions finals, veiem que tots aquests models d'estudi planta/metalls pesants del medi, en diferents graus i nivells, són un veritable laboratori experimental «natural», obert a la recerca, valoració i interpretació de l'home, que ha de permetre situar aquest i tants altres problemes del nostre medi ambient en una relació més harmònica, plaent i humana.

Permeteu-me acabar aquest discurs d'ingrés amb unes breus divagacions finals.

1. Cal estimular els estudis sobre l'estat de salut del nostre medi ambient i de les seves relacions amb tots els sistemes vius, l'ésser humà inclòs, no sols per l'interès *per se*, sinó també perquè hi ha una àmplia opinió i preocupació pública general molt justificada, a causa de l'actual degradació de l'entorn natural que ens envolta. La planta, per la seva plasticitat adaptativa vers la variació del medi, representa un model d'estudi molt idoni, soferit i agraït en resultats per poder interpretar i buscar solucions als problemes que genera la degradació ambiental, i pot fornir dels coneixements necessaris per protegir aquest entorn.

2. Díficilment aquest tipus de recerca pot tenir els trets i els límits d'un equip aïllat. Els diversos mecanismes i nivells s'interaccionen molt complexament. Cal, doncs, una visió multidisciplinària i un profund coneixement del conjunt. Tot un repte per a la formació d'aquest nou tipus de científic especialitzat en el medi ambient, que ha d'aplegar la capacitat analítica i deductiva amb la visió de síntesi, de relació i predicció del paper que juga, i del que hauria de jugar, cada una de les parts en l'harmonia del conjunt.

3. Una més fina i agosarada aproximació biofísica i bioquímica ens ha d'ajudar a completar el coneixement interior del món cel·lular i subcel·lular de la planta. La cèl·lula vegetal és molt distintiva i plurivalent. Només a partir d'aquí es podrà entendre el valor relatiu de la fenomenologia observada i se'n podran destriar les accions primàries i les respostes secundàries provocades per la toxicitat, del que són pròpiament mecanismes de resistència o tolerància de la planta a la toxicitat. Aquestes diferències són molt fines i, ara per ara, són difícils d'escatir.

4. Els fisiòlegs vegetals hem d'avançar en el coneixement dels mecanismes que condicionen el metabolisme i el comportament de la planta. Conceptes com «sensibilitat», «fitohormona», «missatgers», «accions primàries i secundàries», «cèl·lula o òrgan impacte», etc., són paraules que

s'han d'omplir d'un contingut més precís i real, de més veritat científica.

5. Molts especialistes variats (fisiòlegs, botànics, ecòlegs, microbiòlegs, farmacèutics, metges, químics, físics, geòlegs, etc.) han de cuidar el fràgil punt d'harmonia i subministrar la profunditat que requereixen aquest tipus de coneixements. Element, metall, espècie química, planta, animal, home, microorganisme, hàbitat, aliança, perfil, cèl·lula, salut, cultiu, tub d'assaig, per citar-ne alguns, tots són «components» i «eines» a tenir en compte per estudiar i entendre el medi ambient.

6. A més a més de l'esforç dels científics, l'home individual, la societat organitzada, la previsió política, la bona cura legislativa i una estricta i honesta ètica social i individual han de recuperar el paper bàsic, per tal de poder retornar a un equilibri del nostre medi —l'antroposfera— més racional, natural i esperançador; en definitiva, més humana, on cada membre d'aquest fràgil equilibri que forma el sistema home-planta-medi ambient mantingui la seva màxima llibertat i eficiència, raó de ser i finalitat personal, perfectibilitat i joia de ser i d'existir.

Crec que serà bo, com a punt final, tancar aquest discurs amb el que va expressar Goethe en la seva obra d'«aprenentatge» *Wilhelm Meister*: «El mèrit més gran de l'home consisteix a determinar sempre, tant com pugui, les circumstàncies, i deixar-se determinar, tan poc com pugui, per elles».

1. ALLEN, jr., L.H. (1988).
«Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants».
Journal of Environmental Quality, 19, 15-34.
2. ALLEN, W.R., SHEPPARD, P.M. (1971).
«Copper tolerance in some Californian populations of the monkey flower, *Mimulus guttatus*». *Proc. R. Soc., London*, B 177, 177-196.
3. ALSCHER, R.G., CUMMING, J.R. (1990).
Stress Responses in Plants: Adaptation and Acclimation Mechanisms.
Wiley-Liss, New York.
4. ANDO, T., YOSHIDA, S., NISHIYAMA, I. (1983).
«Nature of oxidizing power of rice roots».
Plant Soil, 72, 57-71.
5. ANTONOVICS, J. (1975).
«Metal tolerance in plants; perfecting an evolutionary paradigm».
pp. 169-173 in *Proc. Int. Conf. on Heavy Metals in the Environment*, vol. 2, Toronto, Canadà.
6. ANTONOVICS, J., BRADSHAW, A.D., TURNER, R.G. (1971).
«Heavy metal tolerance in plants».
Adv. Ecol. Res., 7, 1-85.
7. BAKER, A.J.M., BROOKS, R.R. (1989).
«Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements —a review of their distribution, ecology and phytochemistry».
Biorecovery, 1, 81.
8. BAKER, A.J.M., EWART, K., HENDRY, G.A.F., THORPE, P.C., WALKER, P.L. (1990).
«The evolutionary basis of cadmium tolerance in higher plants».
pp. 23-29, in *Environmental Contamination 1990* (J. Barceló, ed.), CEP Consultants Ltd., Edinburgh.
9. BAKER, D.A., HALL, J.L. (1988).
Solute Transport in Plant Cells and Tissues.
Longman Scientific Technical, Essex.

10. BAKER, D.A., MILBURN, J.A. (eds.) (1989).
Transport of Photoassimilates.
Longman Scientific Technical, Essex.
11. BAKER, N.R., LONG, S.P. (1986).
Photosynthesis in Contrasting Environments.
Elsevier, Amsterdam.
12. BARBER, J., BAKER, N.R. (eds.) (1985).
Photosynthetic Mechanisms and the Environment. Elsevier,
Amsterdam.
13. BARCELÓ, J. (ed.) (1990).
Environmental Contamination 1990.
CEP Consultants Ltd., Edinburgh.
14. BARCELÓ, J., CABOT, C., POSCHENRIEDER, CH. (1986).
«Cadmium-induced decrease of water stress resistance in
bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv Contender), II.
Effects of Cd on endogenous abscisic acid levels».
J. Plant Physiol., 125, 27-34.
15. BARCELÓ, J., CREUS, J.A. (1986).
«High and low toxicity of cadmium on polyamine
metabolism of bush bean (*Phaseolus vulgaris*) plants».
Plant Physiol., Suppl., 80, 129.
16. BARCELÓ, J., GUNSÉ, B., POSCHENRIEDER, CH. (1986).
«Chlorophyll and carotenoid contents of *Phaseolus
vulgaris* L. in relation to mineral nutrition disorders
induced by chromium VI supply».
Photosynthetica, 20, 249-255.
17. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH., CABOT, C. (1986).
«Cadmium-, Mangan-, Eisen-, Zink- und Magnesium-
Gehalte von Bohnenpflanzen (*Phaseolus vulgaris* L.)
in Abhängigkeit von Dauer und Höhe des Cadmium-
Angebotes.
Z. Pflanzenernährung Bodenk, 148, 278-288.
18. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH., GUNSÉ, B. (1985).
«Effect of chromium VI on mineral element composition of
bush beans».
Journal of Plant Nutrition, 8, 211-217.
19. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH., GUNSÉ, B. (1986).
«Water relations in chromium-treated bush bean plants
(*Phaseolus vulgaris* L.) under both normal water supply
and water stress conditions».
Journal of Experimental Botany, 37, 178-187.

20. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH., ANDREU, I., GUNSÉ, B.
(1986).
«Cadmium-induced decrease of water stress resistance in
bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv Contender). I.
Effects of Cd on water potential, relative water content and
cell wall elasticity».
J. Plant Physiol., 125, 17-26.
21. BARCELO, J., POSCHENRIEDER, CH. (1989).
«Estrés vegetal inducido por metales pesados».
Investigación y Ciencia, 154, 54-63.
22. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH., GUNSÉ, B. (1989).
«Water relations and cell wall elasticity in cadmium treated
bush bean plants».
pp. 55-65, in *Structural and Functional Responses to
Environmental Stresses.-Water Shortage* (K.H. Kreeb, H.
Richter and T.M. Hinckley, eds.).
SPB Academic Publishing, The Hague.
23. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH., VÁZQUEZ, M.D.,
GUNSÉ, B. (1989).
«Synergism between cadmium-induced ion stress and
drought»
pp. 529-544, in *Plants and Pollutants in Developed and
Developing Countries* (M.A. Öztürk, ed.).
Ege University Press, Bornova, Izmir.
24. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH. (1990).
«Plant water relations as affected by heavy metal stress; a
review».
Journal of Plant Nutrition, 13, 1-37.
25. BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH., VÁZQUEZ, M.D.,
CABOT, C., BENNÁSSAR, A. (1990).
«Technetium as a phytotoxicant»
pp. 214-216, in *Environmental Contamination 1990*
(J. Barceló, ed.).
CEP Consultants Ltd., Edinburgh.
26. BARCELÓ, J., VÁZQUEZ, M.D., POSCHENRIEDER, CH. (1988).
«Cadmium-induced structural and ultrastructural changes
in the vascular system of bush bean stems».
Botanica Acta, 101, 254-261.
27. BARCELÓ, J., VÁZQUEZ, M.D., POSCHENRIEDER, CH.
(1988).
«Structural and ultrastructural disorders in cadmium-
treated bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.)».
New Phytol., 108, 37-49.

28. BASZINSKY, T., WADJS, L., KROL, M., WOLINSKA, D., KRUPA, Z., TUKENDORF, A. (1980).
«Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants».
Physiologia Plantarum, 48, 365-370.
29. BECK, E., LÜTTGE, U. (1990).
«Stress bei Pflanzen».
Biologie in unserer Zeit, 5, 237-244.
30. BENNÁSSAR, A. (1988).
«Tecneci 99» en *Phaseolus vulgaris* L.
Tesi Doctoral, Secretariat de Publicacions i Intercanvi científic de la Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca.
31. BENNÁSSAR, A., CABOT, C., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1989).
«Accumulation of 99Tc in *Phaseolus vulgaris* L.».
pp. 322-325, in *Heavy Metals in the Environment* (J.P. Vernet, ed.). CEP Consultants Ltd., Edinburgh.
32. BENNÁSSAR, A., CABOT, C., VÁZQUEZ, M.D., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1990).
«Accumulation and distribution of Tc-99 in three bean plant varieties».
pp. 593-600 in *Metal Speciation in the Environment* (J.A.C. Broekaert, S. Güçer & T.A. Adams, eds.). Springer Verlag, Berlin.
33. BENNÁSSAR, A., VÁZQUEZ, M.D., CABOT, C., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J.
«Technetium-99 toxicity in *Phaseolus vulgaris*: Ultrastructural evidence for metabolic disorders».
Water, Air and Soil Pollution (en premsa).
34. BJÖRKMAN, O. (1981).
«Responses to different quantum flux densities»
pp. 57-107, in *Physiological Plant Ecology. I. Responses to the Physical Environment* (O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler, eds.). Springer Verlag, Berlin.
35. BLUM, A., (1985).
«Breeding crop varieties for stress environments».
Critical Reviews in Plant Sciences, 2, 199-238.
36. BONET, A., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1991).
«Chromium III-iron interactions in Fe-deficient and Fe-sufficient bean plants. I. Growth and nutrient content».
Journal of Plant Nutrition (en premsa).

37. BONET, B. (1960).
Comèdia. Poemes.
Editorial Barcino, Barcelona.
38. BRADLEY, R., BURT, A.J., READ, D.J. (1981).
«Mycorrhizal infection and resistance to heavy metal toxicity» in *Calluna vulgaris*.
Nature, 292, 335-337.
39. BRADLEY, R., BURT, A.J., READ, D.J. (1982).
«The biology of mycorrhiza in the Ericaceae. VIII. The role of mycorrhizal infection in heavy metal resistance».
New Phytologist, 91, 197-209.
40. BRADSHAW, A.D., McNEILLY, T. (1982).
«Evolution and Pollution». *Studies in Biology*, nº 130.
Edward Arnold, London.
41. BRECKLE, S.W. (1991).
«Growth under stress: heavy metals»
in *The Root System: the Hidden Half* (Y. Waisel, U. Kafkafi & A. Eshel, eds.).
Marcel Dekker Inc., New York.
42. BROOKES, A., COLLIN, J.C., THURMAN, D.A. (1981).
«The mechanism of zinc tolerance in grasses».
Journal of Plant Nutrition, 3, 695-705.
43. BROOKS, R.R. (1983).
Biological Methods of Prospecting for Minerals.
John Wiley and Sons, New York.
44. BROOKS, R.R., RADFORD, C. (1978).
«Nickel accumulation by European species of *Alyssum*».
Proc. R. Soc. London, Sect. B, 200, 217-224.
45. BROWN, D.H. (1984).
«Uptake of mineral elements and their use in pollutions monitoring»
pp. 229, in *The Experimental Biology of Bryophytes* (A.F. Dyer & J.G. Duckett, eds.).
Academic Press, New York.
46. BROWN, A.H.D., FRANKEL, O.H., MARSHALL, D.R., WILLIAMS, J.T. (eds.) (1989).
The Use of Plant Genetic Resources.
Cambridge University Press, Cambridge.
47. CABOT, C. (1985).
«Aspectos fisiológicos de la Fitotoxicidad por Cadmio»
Tesi Doctoral.
Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca.

48. CHAPIN, F.S.III., BLOOM, A.J., FIELD, C.B., WARING, R.H. (1987).
«Plant responses to multiple environmental factors».
Bioscience, 37, 49-57.
49. CHERRY, J.H. (ed.) (1989).
Environmental Stress in Plants. Biochemical and Physiological Mechanisms.
Springer Verlag, Berlin.
50. CHRISTIANSEN, M.N. (1982).
«World environmental limitations to food and fibers»
pp. 1-11, in *Breeding Plants for Less Favorable Environments* (M.N. Christiansen & C.F. Lewis, eds.).
Wiley Interscience, New York.
51. CHRISTIANSEN, M.N., LEWIS, C.F. (eds.) (1982).
Breeding Plants for Less Favorable Environments.
Wiley Interscience, New York.
52. CLARK, R.B. (1982).
«Plant response to mineral element toxicity and deficiency»
pp. 71-142, in *Breeding Plants for Less Favorable Environments* (N.N. Christiansen & C.F. Lewis, eds.).
Wiley Interscience, New York.
53. CLIJSTERS, H., VAN ASSCHE, F., VANGRONSVELD, J. GORA, L. (1990).
«Plant cell membranes as a common target for pollutants and environmental stress?»
pp. 41-44, in *Environmental Contamination 1990* (J. Barceló, ed.).
CEP Consultants Ltd., Edinburgh.
54. COX, R.M., HUTCHINSON, T.C. (1980).
«Multiple metal tolerances in the grass *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. from Sudbury smelting area».
New Phytologist, 84, 631-647.
55. CREUS, J.A., GAVALDÀ, E.G., ENCUESTRA, A., BARCELÓ, J. (1990).
«Poliaminas ligadas a ácidos nucleicos»
pp. 19-31, in *Metabolismo y Modo de Acción de Fitohormonas*.
ed. Universidad de Granada.
56. CUMMING, J.R., TAYLOR, G.J. (1990).
«Mechanisms of metal tolerance in plants: physiological adaptations for exclusion of metal ions from the cytoplasm»

pp. 329-356, in *Stress Responses in Plants: Adaptation and Acclimation Mechanisms* (R.G. Alscher & J.R. Cumming, eds.).
Wiley-Liss, New York.

57. CURL, E.A., TRUELOVE, B. (1986).
The Rhizosphere.
Springer Verlag, Berlin.
58. DAVIES, W.J. (1986).
«Transpiration and the water balance of plants»
pp. 49-154, in *Plant Physiology—a treatise*, vol. 9, *Water and Solutes in Plants*.
Academic Press, Orlando.
59. DIXON, R.K., BUSCHENA, C.A. (1988).
«Response of ectomycorrhizal *Pinus banksiana* and *Picea glauca* to heavy metals in soil».
Plant and Soil, 105, 265.
60. DOWDING, P., CHAPIN, F.S.III., WIELGOLASKI, F.E., KILFEATHER, P. (1981).
«Nutrients in tundra ecosystems»
pp. 647-683, in *Tundra Ecosystems: A Comparative Analysis* (L.C. Bless, D.W. Heal & J.J. More, eds.).
Cambridge University Press, Cambridge.
61. DUDAL, R. (1976).
«Inventory of the major soils of the world with special reference to mineral stress»
pp. 3-13 in *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils* (M.J. Wright, ed.).
Cornell University Agricultural Experiment Station.
62. DUECK, T. (1986).
«Impact of Heavy metals and Air Pollutants on Plants»
Ph.D. Thesis.
Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam.
63. ERNST, W.H.O. (1974).
Schwermetallvegetation der Erde.
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
64. ERNST, W.H.O. (1976).
«Physiological and biochemical aspects of metal tolerance»
pp. 115-133, in *The Effects of Air Pollutants in Plants* (A.T. Mansfield, ed.).
Cambridge University Press, Cambridge.
65. ERNST, W.H.O. (1982).
«Schwermetallpflanzen»

- pp. 472-506 in *Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel* (H. Kinzel, ed.).
Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
66. FERNÁNDEZ, I.J. (1989).
«Effects of acidic precipitation on soil productivity»
pp. 61-83, in *Advances in Environmental Science* (D.C. Adriano & W. Salomons, eds.).
Springer Verlag, New York.
 67. FOWLER, B.A., HILDEBRAND, C.E., KOJIMA, Y., WEBB, M. (1987).
«Nomenclature of metallothionein»
pp. 19, in *Metallothionein II* (J.H.R. Kagi & Y. Kojima, eds.).
Birkhäuser Verlag, Basel.
 68. FOY, C.D., CHANEY, R.L., WHITE, M.C. (1978).
«The physiology of metal toxicity in plants».
Ann. Rev. Plant Physiol., 29, 511-566.
 69. FOY, C.D. (1984).
«Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicity in acid soil»
pp. 57-96, in *Soil Acidity and Liming* (F. Adams, ed.).
Agronomy Series nº 12, 2nd edition, AS-CSSA-SSIA Publ., Madison
 70. FUHRER, J. (1982).
«Early effects of excess cadmium uptake» in *Phaseolus vulgaris*.
Plant Cell Environment, 5, 263-270.
 71. GEKELER, W., GRILL, E., WINACKER, E.L., ZENK, M.H. (1988).
«Algae sequester heavy metal via synthesis of phytochelatin complexes».
Arch. Microbiol., 150, 197-202.
 72. GREGORY, P.J., LAKE, J.V., ROSE, D.A. (1987).
Root Development and Function.
Cambridge University Press, Cambridge.
 73. GREGORY, R.P.F. (1989).
Biochemistry of Photosynthesis.
3rd edition, John Wiley and Sons, Cichester.
 74. GRIERSON, W., SOULE, J., KAWADA, K. (1982).
«Beneficial aspects of physiological stress».
Hort-Reviews, 4, 247-271.
 75. GRILL, E., WINNACKER, E.L., ZENK, M.H. (1985).

- «Phytochelatin: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants».
Science, 230, 674-676.
76. GRILL, E., WINNACKER, E.L., ZENK, M.H. (1987).
«Phytochelatin, a class of heavy-metal-binding peptides from plants, are functionally analogues to metallothioneins».
Proc. Natl. Acad. Sci., USA-84, 439-443.
 77. GUIDI, G.V., PETRUZZELLI, G., VALLINI, G., PERA, A. (1990).
«Plant productivity and heavy metal contamination»
BioCycle, 31, 46-48.
 78. GUNSÉ, B. (1987).
«Efectos del cromo sobre la nutrición y relaciones hídricas de *Phaseolus vulgaris*.
Tesi Doctoral.
Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra.
 79. GUNSÉ, B., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1990).
«Correlation between extractable chromium, chromium uptake and productivity of beans (*Phaseolus vulgaris*) grown on tannery sludge-amended soil».
pp. 307-312, in *Plant Nutrition-Physiology and Applications* (M.L. van Beusichem, ed.).
Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
 80. GUNSÉ, B., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1990).
«Effect of waste chromium on crop plants»
pp. 58-60, in *Environmental Contamination 1990* (J. Barceló, ed.).
CEP Consultants, Ltd., Edinburgh.
 81. HALBWACHS, G. (1989).
«Physiological responses to air pollutants».
pp. 5365-5425, in *Ann. Sci. For.*, 46 suppl. *Forest Tree Physiology* (E. Dreyer et al., eds.).
Elsevier/INRA.
 82. HARLEY, J.L. (1984).
«The mycorrhizal associations».
pp. 148-186 in *Cellular Interactions* (H.F. Linskens & J. Heslop-Harrison, eds.), *Encyclopedia of Plant Physiology, New Series*, vol. 17.
Springer Verlag, Berlin.
 83. HAUG, A. (1984).
«Molecular aspects of aluminum toxicity».
CRC Crit. Rev. Plant Sci., 1, 345-373.

84. HAYNES, R.J. (1980).
«Ion exchange properties of roots and ionic interactions within the root apoplasm: their role in ion accumulation by plants».
Bot. rev., 46, 75-99.
85. HOCK, B., ELSTNER, E.F. (eds.) (1984).
Pflanzentoxikologie.
B.I.Wissenschaftsverlag, Mannheim.
86. HOCK, B., ELSTNER, E.F. (eds.) (1988).
Schadwirkungen auf Pflanzen, Lehrbuch der Pflanzentoxikologie.
2ª edición, Wissenschaftsverlag, Mannheim.
87. HORST, W.J., WAGNER, A., MARSCHNER, H. (1982).
«Mucilage protects root meristems from aluminium injury».
Z. Pflanzenphysiol., 105, 435-444.
88. JACKSON, P.J., UNKEFER, C.J., DOOLEN, J.A., WATT, K., ROBINSON, N.J. (1987).
«Poly(gamma-glutamylcysteinyl)glycine: its role in cadmium resistance in plant cells»
Proc. Natl. Acad. USA., 84, 6619-6623.
89. JACKSON, P.J., UNKEFER, P.J., DELHAIZE, E., ROBINSON, N.J. (1990).
«Mechanisms of trace metal tolerance in plants».
pp. 231-255 in *Environmental Injury to Plants* (F. Katterman).
Academic Press, San Diego.
90. JAFFRÉ, T., BROOKS, R.R., LEE, J., REEVES, R.D. (1976).
«*Sexbertia accuminata*: a nickel-accumulating plant from New Caledonia».
Science, 193, 579-580.
91. KABATA-PENDIAS, A., PENDIAS, H. (1984).
Trace Elements in Soils and Plants.
CRC Press, Boca Raton.
92. KINZEL, H., WEBER, M. (1982).
«Serpentin-Pflanzen».
pp. 381-410 in *Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel* (H. Kinzel, ed.).
Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
93. KONDO, N., ISOBE, M., IMAI, K., GOTO, T. (1985).
«Synthesis of metallothionein-like peptides cadystin A and B occurring in fission yeast, and their isomers».
Agric. Biol. Chem., 49, 71-83.
94. La Vanguardia, Documento (1990). 22, novembre.
«Carta de Paris para una nueva Europa».
95. LARCHER, W. (1987).
«Stress bei Pflanzen».
Naturwissenschaften 74, 158-167.
96. LARSSON, C., MOLLER, I.M. (eds.) (1990).
The Plasma Membrane. Structure, Function and Molecular Biology.
Springer Verlag, Berlin.
97. LERCH, K., BELTRAMINI, M. (1983).
«*Neurospora* copper metallothionein: molecular structure and biological significance».
Chem. Scripta, 21, 109-115.
98. LEVITT, J. (1980).
Responses of Plants to Environmental Stresses.
2nd edition, vol. 1, *Chilling, Freezing and High Temperature Stresses*.
Academic Press, New York.
99. LEVITT, J. (1980).
Responses of Plants to Environmental Stresses.
2nd edition, vol. 2, *Water, Radiation, Salt and Other Stresses*.
Academic Press, New York.
100. LICHTENTHALER, H.K., BUSCHMANN, C. (1984).
Das Waldsterben aus botanischer Sicht.
G. Braun, Karlsruhe.
101. LYNCH, J.M. (ed.) (1990).
The Rhizosphere.
John Wiley and Sons, Chichester.
102. MAAS, F. (1987).
«Responses of plants to sulfur containing air pollutants (H₂S and SO₂)».
Ph.D. Thesis.
Rijksuniversiteit Groningen.
103. MACNAIR, M.R. (1981).
«Tolerance of higher plant to toxic metals»
pp. 177-207, in *Genetic Consequences of Man Made Change* (J.A. Bishop & L.M. Cook, eds.).
Academic Press, London.
104. MASSOT, N., POSCHENRIEDER, Ch., BARCELÓ, J. (1991).
«Aluminum tolerance assessment in bush bean cultivars by root growth analysis and hematoxylin staining».
Suelo y Planta, 1, 25-32.

105. MARGOSHES, M., VALLEE, B.L. (1957).
«A cadmium protein from equine kidney cortex».
J. Am. Chem. Soc., 79, 4813-4814.
106. MATHYS, W. (1975).
«Enzymes of heavy-metal-resistant and non-resistant populations of *Silene cucubalus* and their interaction with some heavy metals in vitro and in vivo».
Physiol. Plant., 33, 161-165.
107. MCCLINTOCK, B. (1984).
«The significance of responses of the genome to challenge».
Science, 226, 792-801.
108. MEYER-ABICH, K.M. (1986).
«Peace with nature, or plants as indicators to the lost of humanity».
Experiencia, 42, 115-120.
109. MINGUZZI, C., VERGNANO, O. (1948).
«Il contenuto di nickel nelle ceneri di *Alyssum bertolonii* Desv.».
Mem. Soc. Toscana Sci. Nat. Ser. A., 55, 49-74.
110. MUNGER, K., LERCH, K. (1985).
«Copper metallothionein from the fungus *Agaricus bisporus*: chemical and spectroscopic properties».
Biochemistry, 24, 6751-6756.
111. MURASUGUI, A., WAADA, C., HAYASHI, Y. (1981).
«Purification and unique properties in UV and CD spectra of Cd-binding peptide 1 from *Schizosaccharomyces pombe*».
Biochem. Biophys. res. Commun., 103, 1021-1028.
112. NOVER, L., NEUMANN, D., SCHARF, K.D. (eds.) (1989).
Heat Shock and Other Stress Response Systems of Plants.
Springer Verlag, Berlin.
113. OLAFSON, R.W., MCCUBBIN, W.D., KAY, C.M. (1988).
«Primary- and secondary- structural analysis of a unique prokaryotic metallothionein from *Synechococcus* sp. cyanobacterium».
Biochem. J., 251, 691.
114. OSMOND, C.B., AUSTIN, M.P., BERRY, J.A., BILLINGS, W.D., BOYER, J.S., DACEY, J.W.D., NOBEL, P.S., SMITH, S.D., WINNER, W.E. (1987).
«Stress physiology and the distribution of plants».
Bioscience, 37, 38-48.

115. ÖZTÜRK, M. (1989).
Plants and Pollutants in Developed and Developing Countries.
Ege University, Izmir, Turkey.
116. POSCHENRIEDER, CH. (1981).
«Aspectos fisiológicos de la fitotoxicidad por manganeso en *Phaseolus vulgaris*».
Tesi Doctoral.
Editorial de la Universidad Complutense de Madrid.
117. POSCHENRIEDER, Ch., BARCELÓ, J. (1985).
«La muerte de los bosques. ¿Tiene la culpa la acidez de la lluvia?».
Circular Farmacéutica, 286, 71-80.
118. POSCHENRIEDER, CH., GUNSE, B., BARCELO, J. (1989).
«Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves».
Plant Physiology, 90, 1365-1371.
119. POSCHENRIEDER, CH., VÁZQUEZ, M.D., BONET, A., BARCELÓ, J. (en prensa, 1991).
«Chromium III-iron interactions in Fe-deficient and Fe-sufficient bean plants. II. Ultrastructural aspects».
Journal of Plant Nutrition, 14.
120. PRASSAD, D.D.K., PRASSAD, A.R.K. (1987).
«Altered δ -aminolaevulinic acid metabolism by lead and mercury in germinating seedlings of bajra (*Pennisetum typhoideum*)».
Journal of Plant Physiology, 127, 241-249.
121. PUCKETT, K.J. (1988).
«Bryophytes and lichens as monitors of metal deposition» pp. 231, in *Lichens, Bryophytes and Air Quality* (T.H. Nash III & V. Wirth, eds.).
J. Cramer, Berlin.
122. RABINOWITCH, E., GOVINDJEE (1969).
Photosynthesis.
John Wiley, New York, p. 5.
123. RAUSER, W.W.E. (1990).
«Phytochelatin».
Ann. Rev. Biochem., 59, 61-86.
124. REEVES, R.D., BROOKS, R.R. (1983a).
«European species of *Thlaspi* L. (Cruciferae) as indicators of nickel and zinc».
J. Geochem. Explor., 18, 275.

125. REEVES, R.D., BROOKS, R.R. (1983b).
«Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from a mining area in Central Europe».
Environ. Pollut. Ser. A., 31, 287-300.
126. REEVES, R.D., BROOKS, R.R., DUDLEY, TH.R. (1983).
«Uptake of nickel by species of *Alyssum*, *Bornmuellera*, and other genera of old world tribus of *Alysseae*».
Taxon, 32, 184-192.
127. REILLY, C., STONE, J. (1971).
«Copper tolerance in *Becium homblei*».
Nature, 230, p. 403.
128. ROBINSON, N.J. (1990).
«Metal-binding polypeptides in plants»
pp. 195-214, in *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*.
CRC Press, Boca Raton.
129. RHODE, H. (1989).
«Acidification in a global perspective».
Ambio, 18, 155-160.
130. ROWLAND, F.S. (1990).
«Stratospheric ozone depletion by chlorofluorocarbons».
Ambio, 19, 281-292.
131. RUANO, A., BARCELÓ, J., POSCHENRIEDER, CH. (1987).
«Zinc toxicity-induced variation of mineral element composition in hydroponically grown bush bean plants».
Journal of Plant Nutrition, 10, 373-384.
132. RUANO, A., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1988).
«Growth and biomass partitioning in Zn-toxic bush beans».
Journal of Plant Nutrition, 11, 577-588.
133. SAMARAKOON, A.B., RAUSER, W.E. (1979).
«Carbohydrate levels and photoassimilate export from leaves of *Phaseolus vulgaris* exposed to excess Co, Ni and Zn».
Plant Physiol., 63, 1165-1169.
134. SHAW, A.J. (ed.). (1990).
Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects.
CRC Press, Boca Raton, Florida.
135. STEFFENS, J.C. (1990).
«Heavy metal stress and the phytochelation response»
pp. 377-394, in *Stress Responses in Plants: Adaptation*

and *Acclimation Mechanisms* (R.G. Alsher & J.R. Cummings, eds.).
Wiley-Liss, New York.

136. STEFFENS, J.C., HUNT, D.F., WILLIAMS, B.G. (1986).
«Accumulation of non-protein heavy metal-binding polypeptides (-glutamyl-cysteinyl)n-glycine in selected cadmium-resistant tomato cells».
J. Biol. Chem., 261, 13879-13882.
137. STIBOROVA, M. (1988).
«Cd²⁺ ions affect the quaternary structure of ribulose-1,5-biphosphate carboxylase from barley leaves».
Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 183, 371-378.
138. SUHAYDA, C.G., HAUG, A. (1986).
«Organic acids reduce aluminum toxicity in maize root membranes».
Physiol. Plant., 68, 189-195.
139. TAYLOR, G.J. (1988).
«The physiology of aluminum phytotoxicity»
pp. 123-163 in *Metal Ions in Biological Systems*, vol. 24, *Aluminum and its Role in Biology* (H. Sigel & A. Sigel, eds.).
Marcel Dekker, Inc. New York.
140. TAYLOR, G.J. (1989).
«Aluminum toxicity and tolerance in plants»
pp. 327-361, in *Advances in Environmental Science* (D.C. Adriano & W. Salomons, eds.).
Springer Verlag, New York.
141. THRESHOW, M. (1984).
Air Pollution and Plant Life.
John Wiley & Sons, Chichester.
142. THRESHOW, M., ANDERSON, F.K. (1989).
Plant Stress from Air Pollution.
John Wiley & Sons, Chichester.
143. TOMSETT, A.B., THRUMAN, D.A. (1988).
«Molecular biology of metal tolerances of plants».
Plant, Cell and Environment, 11, 383-394.
144. TURNER, N.C., KRAMER, P.J. (eds.) (1980).
Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress.
John Wiley & Sons, New York.
145. VAN ASSCHE, F., CEULEMANS, R., CLIJSTERS, H. (1980).
«Zinc mediated effects on leaf CO₂ diffusion conduc-

tances and net photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L.». *Photosynthesis Research*, 1, 171-180.

146. VAN ASSCHE, F., CLIJSTERS, H. (1983).
«Multiple effects of heavy metal toxicity on photosynthesis»
pp. 371-382, in *Effects of Stress on Photosynthesis* (R. Marcelle, H. Clijsters & M. van Pouke, eds.).
Martinus Nijhoff/Dr. w. Junk Publ. The Hague.
147. VAN ASSCHE, F., CLIJSTERS, H. (1986).
«Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L. by treatment with toxic concentrations of zinc: effects on electron transport and photophosphorylation».
Physiol. Plant., 66, 717-721.
148. VAN ASSCHE, F., CLIJSTERS, H. (1986).
«Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L. by treatment with toxic concentrations of zinc: effects on ribulose-1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase».
J. Plant Physiol., 125, 355-360.
149. VAN ASSCHE, F., CLIJSTERS, H. (1990).
«Effects of metals on enzyme activity in plants».
Plant, Cell and Environment, 13, 195-206.
150. VAN ASSCHE, F., CLIJSTERS, H., MARCELLE, R. (1979).
«Photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L. as influenced by supra-optimal zinc nutrition»
pp. 175-184, in *Photosynthesis and Plant Development* (R. Marcelle, H. Clijsters & M. van Pouke, eds.).
Junk Publishers, The Hague.
151. VAN ASSCHE, F., VANGRONSVELD, J., CLIJSTERS, H. (1990).
«Physiological aspects of metal toxicity in plants».
pp. 246-250, in *Environmental Contamination 1990* (J. Barceló, ed.).
CEP Consultants, Edinburg.
152. VÁZQUEZ, M.D., BENNÁSSAR, A., CABOT, C., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1990).
«Phytotoxic effects of technetium-99 in beans: influence of cotyledon excision».
Environmental Experimental Botany, 30, 271-281.
153. VÁZQUEZ, M.D., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1987).
«Chromium VI induced structural and ultrastructural changes in bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.)».
Annals of Botany (London), 59, 427-438.

154. VÁZQUEZ, M.D., POSCHENRIEDER, CH., BARCELÓ, J. (1989).
«Pulvinus structure and leaf abscission in cadmium-treated bean plants (*Phaseolus vulgaris*)».
Canadian Journal of Botany, 67, 2756-2764.
155. VITOUSEK, P.J. (1984).
«Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forest».
Ecology, 65, 285-298.
156. WAGASTSUMA, T., EZOE, Y. (1985).
«Effect of pH on ionic species of aluminum in medium and on aluminum toxicity under solution culture».
Soil Sci. Plant Nutr., 31, 547-561.
157. WASEL, Y., KAFKAFI, U., ESHEL, A. (eds.) (1991).
The Roots System: The Hidden Half.
Marcel Dekker, Inc., New York.
158. WASSERMAN, J.L., MINEO, L., MAJUNDAR, S.K. (1987).
«Detection of heavy metal in oak mycorrhizae of Notheastern Pennsylvania forest, using X-ray microanalysis».
Canadian Journal of Botany, 65, 2622-2627.
159. WEBBER, J. (1981).
«Trace metals in agriculture»
pp. 159-184, in *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants*, vol. 2, N.W. Lepp (ed.).
Applied Science Publ. London.
160. WERNER, D. (1987).
Pflanzliche und mikrobielle Symbiosen.
Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
161. WINGE, D.R., NIELSON, K.B., GRAY, W.R., HAMER, D.H. (1985).
«Yeast metallothionein: sequence and metal-binding properties».
J. Biol. Chem., 260, 14464.
162. WIESSEMEIER, A.H., KLOTZ, F., HORST, W.J. (1987).
«Aluminum induced callose synthesis in roots of soybean (*Glycine max* L.)».
Journal of Plant Physiology, 129, 487-492.
163. WOOLHOUSE, H.W. (1983).
«Toxicity and tolerance in response of plants to metals»
pp. 246-300 in *Encyclopedia of Plant Physiology, New Series*, vol. 12 C. (O.L. Lange et al., eds.).
Springer Verlag, Berlin.

164. WOZNY, A., STROINSKI, A., GWOZDZ, E. (1990).
«Plant cell responses to cadmium».
Adama Mickiewicza University Press Poznan (Poland),
Ser. Biologia, 44, 5-29.
165. ZIMMERMANN, M.H. (1983).
Xylem structure and the Ascent of Sap.
Springer Verlag, Berlin.

DISCURS D'ACOLLIMENT

De l'Acadèmica emèrita
Molt Il·lustre Prof. Dra. Creu Casas i Sicart

**Excel·lentíssim Senyor President,
Excel·lentíssims i Il·lustríssims Senyors,
Molt Il·lustres Senyors i Senyores Acadèmics,
Senyores i senyors,**

En compliment d'un acte reglamentari, els membres de la Junta Directiva em van demanar de rebre i donar la benvinguda a un nou membre electe d'aquesta Corporació. Amb sinceritat, he de confessar que em sento molt honorada per aquesta comesa. El motiu de la meva satisfacció és, precisament, perquè la investigació científica del Dr. Barceló és dedicada a l'estudi del comportament fisiològic dels vegetals, als quals jo he dedicat tota la meva vida en l'aspecte taxonòmic i la distribució geogràfica. Ambdues disciplines es troben íntimament relacionades, encara que difereixen considerablement per la metodologia i pel desenvolupament del treball. Però encara és més important per a mi que la Providència hagi permès que, a causa de la meva ja llarga vida, pugui honorar aquelles persones les quals eren estudiants quan jo iniciava la carrera docent. És per això que, si bé hem seguit direccions diferents dins la biologia vegetal i en cap moment he pogut gaudir personalment del seu interès i dels seus coneixements, avui em plau extraordinàriament ser designada per oferir-li la benvinguda a aquesta Corporació farmacèutica.

Tot i que hem enfilat camins diferents, que ens han allunyat físicament i intel·lectualment, recordo perfectament la seva estada a la Facultat de Farmàcia de Barcelona, i el recordo, en primer lloc, com a un estudiant brillant, seriós i molt responsable en totes les activitats. Molts anys després ens hem tornat a trobar a la Universitat Autònoma de Barcelona quan jo ja complia l'edat reglamentària per a la jubilació. La creació del Professor Emèrit ha permès que coincidim en el mateix Departament de biologia vegetal.

El Dr. Joan Barceló i Coll va néixer l'any 1938 a Palma de Mallorca. És Llicenciat i Doctor en Farmàcia per la Facul-

tat de Farmàcia de la Universitat de Barcelona amb les màximes qualificacions.

Durant l'activitat docent, iniciada el 1965, ha seguit tots els escalafons, propis de cada moment, sense interrupció, des de becari, professor ajudant, professor adjunt, professor agregat a la Universitat de Barcelona, fins al seu nomenament, el 1976, com a catedràtic numerari a la Facultat de Farmàcia de la Universitat Complutense de Madrid amb dedicació exclusiva. Sempre dedicat a la disciplina de fisiologia vegetal, per extensió ha fet cursos de citologia i d'histologia vegetal. El 1980, per trasllat, pren possessió de la Càtedra de fisiologia vegetal a la darrerament creada Universitat de les Illes Balears, i el 1982, per un nou trasllat, es fa càrrec de l'ensenyança de la mateixa disciplina a la Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona. Ha impartit nombrosos cursos de doctorat, sempre sobre temes relacionats amb la fisiologia de les plantes. La seva activitat docent, que passa per totes les titulacions, li confereix els coneixements i la pràctica necessaris per obtenir l'adequació pròpia per a un ensenyament científic, teòric i pràctic, de primer ordre, que només amb l'experiència hom pot atènyer.

La seva activitat de recerca abasta fonamentalment, temes relacionats amb l'acció dels UV sobre les plantes, el metabolisme nitrogenat-alcalòidic de les plantes, la fisiologia de les plantes en condicions adverses (estrès iònic, hídric i salí). El conjunt d'aquest treball es reflecteix en la direcció de catorze tesis doctorals i trenta-set tesines de llicenciatura. Però, sobretot, en les més de 200 publicacions, entre llibres, comunicacions i ponències en congressos internacionals i nacionals. Ha participat en l'organització de congressos nacionals i internacionals en funció de president o vocal del Comitè Científic.

Ha rebut, entre altres, el premi Dr. Soler i Batlle del M.I. Colegio Oficial de Farmacéuticos de Barcelona (1964) i el premi «Cofares» de la Real Academia de Farmacia (1979).

Ultra el català i el castellà domina els idiomes anglès, alemany i francès, cosa que li ha facilitat la relació científica amb eminents personalitats de tot el món.

A més dels seu valer científic voldria remarcar, i em plau extraordinàriament de fer-ho, la seva qualitat humana, demostrada, entre altres aspectes, en el reconeixement que ret,

en primer lloc, als seus pares i després als seus mestres. Pocs vegades hom fa referència als mestres que han conduït la nostra infància. Ells i els pares imprimeixen en l'infant aquells condicionants que, d'acord amb les qualitats innates, conduiran, a través d'un procés normal, a una fita definida i en faran, en definitiva, un home feliç i útil a la societat.

El Dr. Barceló ha rememorat frases d'escriptors i científics eminents. Jo recullo les atribuïdes a Cervantes i penso que si el gran Quixot ara repetia el viatge a Barcelona, en apropar-se a les grans poblacions que ja no són els poblets d'aleshores, entre les granges agrícoles i ramaderes, les indústries i les deixalles, es trobaria amb uns riets receptors d'aigües residuals convertits en clavegueram a cel obert, amb els fums de les altes xemeneies en forma de ràfegues allargassades que arriben fins qui sap on, i amb les piles d'escombraries arreu. En el seu nou viatge veuria destruïdes o molt esclarides algunes de les rebolledes, els alzinars, els carrascars, les rouredes i drenades les llacunes. Ja no trobaria al voltant de Barcelona les hortes que nodrien els habitants de la ciutat. En el seu lloc, indústries que contaminen i aigües corruptes del tot, inutilitzables per a qualsevol ús. Comprendria l'escàs grau de sensibilitat del poble que ha permès malmetre una naturalesa de bellesa incomparable i de gaudi tan econòmic. I tot com a conseqüència del desaforat ús d'un país sense planificació ordenada ni previsió de futur. Em penso que d'aquesta visió en sorgiria un altre Quixot que lluitaria amb tots els nous gegants i penso que malauradament, altra vegada, el prendrien per boig.

Tots sabem la inportància que tenen les plantes per a la nostra supervivència. Però també, molts cops, hom oblida que sense els vegetals no hi hauria vida animal. Les plantes constitueixen l'aliment bàsic dels herbívors i aquests són l'aliment dels carnívors. Així es clou la cadena alimentària. La seva utilitat també es manifesta en altres àmbits tan importants com és l'intercanvi gasós, per exemple. La influència dels vegetals sobre la vida animal, tan palpable, no ha estat prou copsada a temps per la societat. Sembla que ara, quan hom pressent el perill, la societat comença a interessar-se per tal que els científics procurin esbrinar el funcionament del nostre medi. Aquest és molt complex i requereix l'esforç de científics de les diferents àrees del saber. El Dr. Barceló, a base de recerca, posa una anella important a la contribució en aquesta tasca decisiva per a la supervivència humana i, per extensió, per a la vida animal.

He de confessar que m'és del tot impossible fer un just comentari al discurs del Dr. Barceló. La meua dedicació de recerca està molt allunyada de la seva, però sí que puc dir que és d'una evident actualitat i ens demostra que és un expert coneixedor del tema. Ens l'ha tramès d'una forma agradable, ha anat desgranant, transpuant la seva vena literària aflorada fins en les converses del més elevat rigorisme científic, de manera ordenada els seus coneixements sobre les relacions planta-metalls pesants i els mecanismes de resposta fisiològica de les plantes, ha analitzat la influència dels metalls pesants sobre cada una de les parts que constitueixen el vegetal complet i ha palesat els mecanismes de tolerància.

Pero sí que desitjo fer un incís al seu discurs amb unes opinions meves, exponents de la meua preocupació per l'avenir de la botànica i la fisiologia vegetal en el nostre país. Hem comentat la importància de les plantes per a la vida de la persona. Molt sovint hom se n'oblida, de manera que aquest fet tan real, per consuetudinari, escapa a la nostra observació. Els continguts de les disciplines de la biologia vegetal, a cada nou pla d'estudis de Farmàcia minven més i més, i darrerament es pretén deixar-los com a una mera història del passat. L'home sempre necessitarà alimentar-se i guarir-se a més d'altres usos dels vegetals, i encara la naturalesa li amaga molts secrets que li cal esbrinar. Si és ben cert que la bioquímica, la genètica, etc., avancen actualment a un ritme accelerat, no ho és menys que a la base d'aquests estudis hi ha uns éssers vius dels quals cal conèixer les característiques morfològiques, les formes de vida, els cicles biològics, la fisiologia etc., els quals ens permetran de conèixer les seves exigències vitals i potser modificar-les per tal d'obtenir millor rendiment quan calgui. Temo molt que els estudiants de Farmàcia ignoraran aquest camp d'investigació o el tindran per obsolet quan encara no es coneixen, ni de bon tros, la composició química de molts principis elaborats per les plantes, el seu funcionament i utilitat per a la vida de la planta i la seva posterior aplicació al camp de la medicina científica o de l'alimentació, si hi escau. La biologia vegetal, inclosa la taxonomia, que permet la identificació de les plantes, i la fisiologia vegetal el seu funcionament, són bàsiques per a l'estudi de totes les altres disciplines: ecologia, genètica, bioquímica, etc., cadascuna de les quals constitueixen els pilars decisius per a la conservació i millorament del medi en el qual estem submergits i del qual depenem.

En resum, el discurs del Dr. Barceló és una síntesi de la labor realitzada i la manifestació de la maduresa aconseguida

en el transcurs dels anys dedicats exclusivament al servei d'una arrelada i ferma vocació amb la companyia d'un entorn familiar immillorable que, junt amb les seves condicions humanes, li han valgut ser proposat per ocupar un lloc en la Reial Acadèmia de Farmàcia de Barcelona. Ostentarà la medalla núm. 40 de nova designació, destinada a la Secció de Ciències Naturals. Secció que ara es troba desmembrada per la recent creació de la Secció de Farmacologia i pel pas a Membres Emèrits del Dr. Salord i de mi mateixa. Em penso que per reconstituir aquesta Secció, en què ara només figura el Dr. Parés, l'Acadèmia, amb molt d'encert, ha acceptat la proposta d'ingrés del Dr. Barceló.

Li auguro una llarga permanència i desitjo que trobi en aquesta Acadèmia un lloc agradable de comunicació i convivència i que els membres gaudim, d'ara endavant, de les seves exposicions científiques o de les seves investigacions o dictàmens quan l'Acadèmia ho requereixi.

No dubto que aportarà una notable col·laboració a les activitats de l'Acadèmia i aquesta es veurà molt honorada en tenir-lo com a Membre Numerari.

Moltes gràcies.