

BONES PRÀCTIQUES D'ÚS DE LA RESISTÈNCIA VEGETAL PER OPTIMITZAR EL CONTROL DE MELOIDOGYNE EN CULTIUS HORTÍCOLES I EVITAR LA SELECCIÓ DE VIRULÈNCIA

Resum

Meloidogyne és el principal gènere de nematodes fitoparàsits que limiten la producció hortícola a escala mundial. Un dels mètodes clau per combatre'l és la resistència vegetal, una eina eficaç, econòmicament rendible i sense efectes nocius sobre el medi ambient i la salut de les persones. No obstant, el seu ús condicionarà la seva efectivitat i la possible selecció de poblacions virulentes del nematode capaces de superar els mecanismes de defensa de la planta. Aquesta fitxa presenta les diferents fonts de resistència al nematode *Meloidogyne* en cultius hortícoles, els seus avantatges i inconvenients i la manera d'usar-les per optimitzar-ne l'eficàcia i preservar-la en el temps. En definitiva, les Bones Pràctiques d'ús de la resistència vegetal per al control del nematode i per evitar la selecció de virulència.

01. Introducció

Meloidogyne és el principal gènere de nematodes fitoparàsits que limiten la producció hortícola a escala mundial. El símptoma més característic que mostren les plantes parasitades són les agalles que desenvolupen les arrels a conseqüència de la infecció pel nematode, mentre que, a la part aèria, els símptomes són inespecífics, com ara falles de nascència, nanisme, marcimement, dèficit de nutrients, etc., i es poden confondre amb els causats per altres agents biòtics i abiòtics (figura 1).



Figura 1. Agalles causades per *Meloidogyne* en arrels (esquerra) i símptomes de la part aèria de plantes parasitades pel nematode (dreta).

De les més de 100 espècies del nematode identificades fins al moment, quatre són les més àmpliament distribuïdes arreu del món i les responsables de la majoria de pèrdues de producció ocasionades per aquest gènere, les anomenades espècies tropicals: *M. arenaria*, *M. incognita* i *M. javanica*, i l'espècie temperada *M. hapla*. Poden parasitar un elevat nombre d'espècies vegetals, tant herbàcies com llenyoses, siguin cultivades o adventícies, cosa que els permet sobreviure en gairebé qualsevol sòl agrícola.

El cicle de vida d'aquestes quatre espècies és semblant. El nematode es troba, majoritàriament, en estadi d'ou en les restes d'arrels o en el sòl, i en menor abundància com a segon estadi juvenil (J2; figura 2) en el sòl. Els ous es troben immersos en una matriu gelatinosa que els protegeix de factors externs (figura 2).

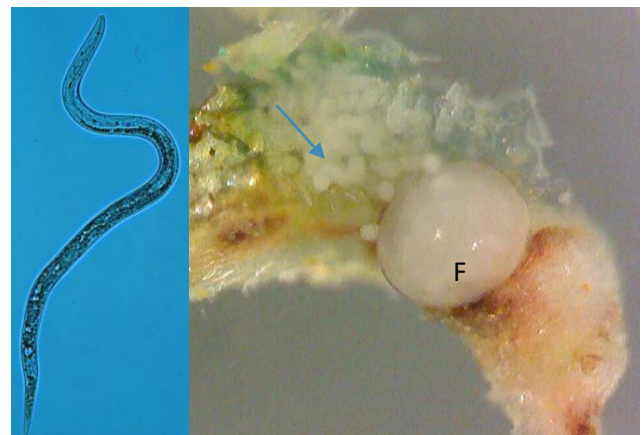


Figura 2. Juvenil de segon estadi (J2) de *Meloidogyne* (esquerra) i femella (F) i nombrosos ous (fletxes) en una massa d'ous (dreta).

L'emergència dels J2 dels ous es produirà quan la temperatura i la humitat del sòl siguin adequades (>12° C i saó) sense necessitar exhudats d'arrels de plantes hoste. El J2 es mourà en la pel·lícula d'aigua entre les partícules del sòl cercant una arrel per parasitar-la. En les reaccions compatibles, el nematode penetrarà l'arrel just rere l'apex de creixement mitjançant l'estilet i enzims que desfan el ciment intercel·lular, i es mourà en l'interior de l'arrel per instal·lar-se en el cilindre vascular, en el qual induirà la formació de cèl·lules gegants amb nombrosos nuclis i orgànuls (figura 3), la qual cosa crea un lloc d'alimentació del qual obtenir l'aliment necessari per completar el seu cicle de vida.

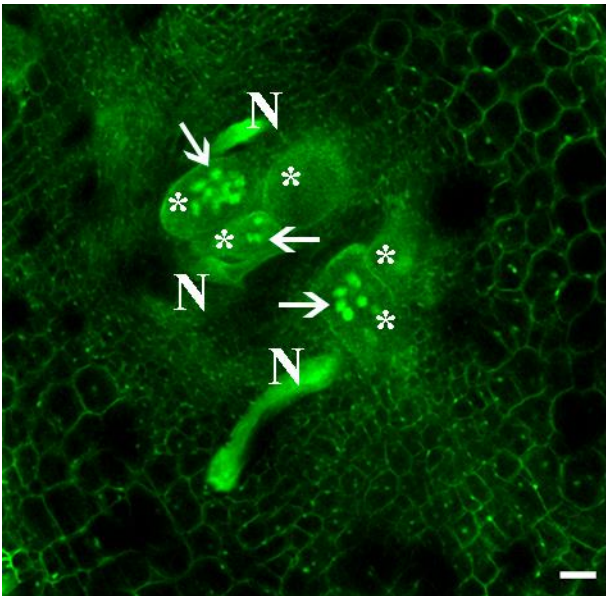


Figura 3. Cèl·lules gegants induïdes per *Meloidogyne* en tomàquet susceptible. Nematode (N), cèl·lules gegants (*) amb nombrosos nuclis (fletxes). Escala: 50 µm.

Les plantes, però, disposen de mecanismes de defensa, tant físics com químics, per evitar la penetració, infecció, desenvolupament i reproducció del nematode que donen lloc a reaccions incompatibles, cosa que es manifesta en un cert grau de resistència al patògen. Aquesta reacció pot anar des de la incompatibilitat total, i les plantes s'anomenen no hostes, a una inhibició més o menys intensa, i aleshores s'anomenen hostes pobres (quan tots els individus de l'espècie vegetal mostren aquest comportament), o resistents (quan certs individus de l'espècie la mostren per tenir gens específics de resistència) (figura 4). La resistència vegetal és un atribut de la planta regulat genèticament, i ha estat utilitzat pels milloradors genètics per aconseguir varietats i portaempelts comercials resistents envers les principals espècies de *Meloidogyne*, principalment les espècies tropicals, que són les més abundants a la zona mediterrània i les que causen la majoria de pèrdues de producció en cultius hortícoles.

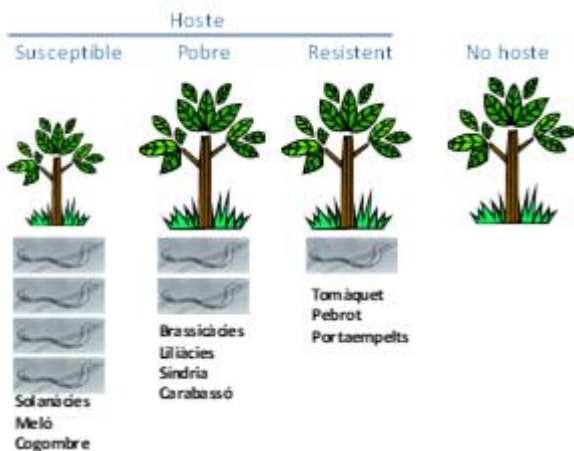


Figura 4. Tipus de planta hoste de *Meloidogyne* segons la seva capacitat per reproduir-s'hi. De més a menys: susceptible>pobre>resistent>no hoste.

02. Resistència vegetal: avantatges i inconvenients

La resistència vegetal és una eina de control efectiva, econòmicament rendible i sense efectes nocius sobre el medi ambient i la salut de les persones. A més, quan s'utilitza en sistemes de rotació, protegeix el cultiu successor, ja que limita el creixement de la població del nematode i les pèrdues de producció que pot ocasionar. Ara bé, hi ha dos factors cabdals que cal considerar perquè la resistència sigui efectiva: 1) el seu ús reiterat pot seleccionar poblacions virulentes, capaces de superar els mecanismes de defensa de la planta, i 2) temperatures constants del sòl superiors a 28-30° C durant períodes prolongats poden afectar l'expressió d'alguns gens de resistència, com passa en tomàquet i en alguns germoplasmes de pebrot (els portadors del gen *N*). És per això que a l'hora d'utilitzar la resistència vegetal caldrà considerar una sèrie de premisses que constituïran les Bones Pràctiques d'ús de la resistència vegetal perquè sigui efectiva, eviti la selecció de virulència i preservi la seva eficàcia en el temps.

La disponibilitat de varietats i patrons resistents comercials a *Meloidogyne* és limitada i restringida a plantes de la família de les solanàcies. Per a tomàquet i pebrot, es diposa de varietats i de portaempelts resistents, encara que la resistència en un o altre material és conferida pels mateixos gens: el gen *Mi-1.2* en tomàquet, i els gens *N*, *Me1* i *Me3* en pebrot. Aquests gens s'expressen envers les espècies tropicals: *M. arenaria*, *M. incognita* i *M. javanica*. El seu ús reiterat (2 o 3 cultius consecutius) augmenta la freqüència d'individus virulents en la població fins a trencar la resistència (figura 5).



Figura 5. Tomaqueres empeltades en el patró resistent 'Brigeor' cultivades en sòl infestat per una població virulenta de *M. incognita* (esquerra) o avirulenta (dreta).

L'adquisició de virulència per part del nematode suposa una disminució de la seva capacitat de reproduir-se en genotips susceptibles de la mateixa espècie. *A priori*, caldria esperar que l'alternança de varietats resistents i

susceptibles d'una mateixa espècie podria ajudar a gestionar el nematode de manera eficient, però el monocultiu contravé el principi d'agricultura sostenible.

En albergínia, no es disposa de varietats resistents, però sí del patró comercial resistent *Solanum torvum*. En aquest cas, no ha estat demostrada la selecció de virulència en relació amb la seva freqüència d'ús, encara que al Japó han estat citades algunes poblacions de *M. arenaria* i *M. incognita* amb un cert grau de virulència. En cucurbitàcies, no es disposa de cap germoplasma resistent comercial, encara que la síndria és un hoste pobre i alguns portaempelts de les espècies *Cucumis metuliferus* i *Citrullus amarus*, que han mostrat ser resistents, podrien ser comercialitzats en el futur. Els patrons de carbassa, que són sovint utilitzats per la seva resistència a fongs del terra, són tolerants però no resistents a *Meloidogyne*, cosa que afavoreix el creixement de poblacions que impactaran de manera més greu en el cultiu següent de la rotació.

L'ús del mateix gen de resistència en monocultiu, o amb alta freqüència d'ús, afavoreix la selecció de poblacions virulentes. Cal alternar diferents gens de resistència.

A banda de la resistència intrínseca de la planta, aquesta resistència pot ser intensificada per agents biòtics i abiòtics, cosa que es coneix com a resistència induïda. Se sap que algunes espècies de *Trichoderma* poden induir resistència envers *Meloidogyne* en varietats de tomàquet susceptibles (no portadors del gen *Mi-1.2*), i fins i tot induir-la en varietats resistents envers poblacions virulentes al gen *Mi-1.2*, cosa que demostra un efecte additiu de la resistència mediada per gens específics i la induïda per microorganismes. Altres fongs, com el paràsit d'ous del nematode *Pochonia chlamydosporia*, i el bacteri *Bacillus firmus* soca I-1582, també són capaços d'induir resistència en tomàquet susceptible. No obstant, cap no va induir resistència en cogombre, cosa que indica que aquesta propietat depèn de la planta, i, per tant, totes les espècies vegetals no reaccionen d'igual manera. Estudis preliminars fets pel grup GINEMQUAL de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) han mostrat la capacitat d'extractes d'algues i dels mírids *Nesidiocoris tenuis* i *Macrolophus pygmaeus* d'induir resistència en varietats de tomàquet susceptibles envers el nematode. Aquests resultats obren la porta a utilitzar la resistència induïda com una font complementària de resistència en programes de gestió integrada del nematode.

Els inductors de resistència vegetal són una eina complementària per al control del nematode en cultius que no disposen de gens específics de resistència, o, en aquells que en disposen, per disminuir la possibilitat de seleccionar poblacions virulentes. Cal tenir en compte, però, que la capacitat d'induir resistència depèn de l'espècie vegetal.

03. Com evitar la selecció de virulència

La manera d'evitar la selecció de virulència és la rotació de cultius amb diferents fonts de resistència. El disseny de seqüències de rotació amb cultius que són no hostes, hostes pobres i resistents, tot espaiant el cultiu d'hostes susceptibles al nematode, a banda de gestionar les densitats de nematodes i reduir les pèrdues que causen, pot contribuir a millorar les característiques fisicoquímiques i l'activitat microbiana del sòl, aspectes clau per a una agricultura sostenible.

Els resultats de 6 anys d'experiments de rotació de cultius duts a terme pel grup GINEMQUAL de la UPC han mostrat que la rotació amb dos fonts de resistència diferents, concretament tomàquet-meló (T-M) i meló-tomàquet (M-T) sense empeltar o empeltats (GT-GM o GM-GT) en els patrons resistents de tomàquet 'Aligator' i de meló *C. metuliferus*, no era suficient per evitar la selecció de virulència al gen *Mi-1.2* del tomàquet, però el nivell de virulència s'atenuava després del cultiu de meló empeltat (figura 6).

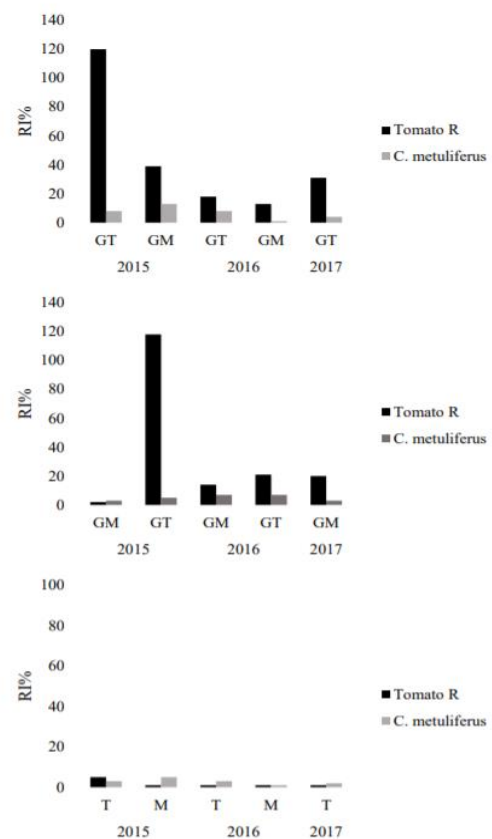


Figura 6. Índex de reproducció (RI; percentatge del nombre d'ous produïts en una varietat de tomàquet resistent respecte dels produïts en una varietat de tomàquet susceptible) de *M. incognita* després del cultiu de tomàquet (T) i meló (M) sense empeltar o empeltats en patrons resistents de tomàquet (GT) i de meló (GM). La població de nematode es considera virulenta a valors de RI >50%.

La producció acumulada de la rotació amb plantes resistents va ser 2,8 vegades major que quan se succeïen

plantes susceptibles. En incrementar el nombre de fonts de resistència en rotació, concretament tomàquet-meló-pebrot-síndria-tomàquet sense empeltar o empeltats en els patrons resistents 'Brigeor', *C. metuliferus*, 'Oscos' i *C. amarus*, respectivament, els resultats van mostrar la seva idoneïtat per controlar el nematode i evitar la selecció de virulència. A més, la rotació també va ser efectiva envers la població virulenta al gen *Mi-1.2* seleccionada en la rotació tomàquet-meló i viceversa. Quant a la producció acumulada, va ser entre 1,5 i 2,4 vegades major en la rotació amb plantes resistents que amb susceptibles.

La rotació de dos gens de resistència és insuficient per evitar la selecció de virulència a algun dels dos. **Cal alternar més de dos gens de resistència diferents per evitar la selecció de virulència i disminuir la densitat de població del nematode a nivells que no causin pèrdues de producció.**

Una altra font de resistència que es pot incloure en seqüències de rotació és l'albergínia empeltada en *S. torvum*. En estudis duts a terme pel grup GINEMQUAL, ha mostrat un alt nivell de resistència i una important reducció de les pèrdues de producció (> 50%) quan es cultiva per un període superior a 5 mesos en sòls infestats pel nematode. No obstant, en estudiar la possible compatibilitat com a patró de tomàquet, s'ha vist que aquest tomàquet creix més lentament, triga més a entrar en producció i alguns fruits mostren necrosi apical, per la qual cosa se'n desaconsella l'ús. Així mateix, s'han fet estudis amb varietats d'enciam i de mongeta tendra que mostren diversos nivells de resistència envers el nematode.

Un aspecte clau per preservar l'eficàcia de la resistència vegetal és utilitzar-la en el marc d'una estratègia de gestió integrada en què es combinin diversos mètodes de control de manera compatible per mantenir les densitats del nematode a nivells que no causin dany econòmic. És sabut que l'ús de resistència específica a un determinat gènere o espècies de nematodes fitoparàsits pot induir canvis en la comunitat de nematodes i substituir els gèneres i/o espècies causants dels problemes. És per això que el grup GINEMQUAL va elaborar una proposta d'actuació per dur a terme una estratègia general de gestió de nematodes fitoparàsits prioritzant mètodes de gestió alternatius a l'ús de nematicides químics que es pot consultar en obert (Giné *et al.*, 2020).

04. Bones Pràctiques d'ús de la resistència vegetal

A partir dels treballs realitzats per grup GINEMQUAL, i dels publicats fins avui, sobre l'ús de la resistència vegetal per al control de *Meloidogyne* evitant la selecció de poblacions virulentes, se'n deriven les restriccions i recomanacions següents:

Restriccions

- Utilitzar el mateix gen de resistència en monocultiu o amb alta freqüència, ja que afavoreix la selecció de poblacions virulentes.
- Utilitzar genotips resistents en èpoques en què la temperatura del sòl es manté per sobre de 28°C durant períodes prolongats, ja que la resistència no s'expressa de manera eficient. Convé utilitzar encoixinats per mantenir una temperatura més baixa del sòl.
- La rotació de només dos gens de resistència diferents és insuficient per evitar la selecció de virulència a algun dels dos, encara que el nivell de virulència s'atenuï gràcies a la rotació.
- Utilitzar agents inductors de resistència sense saber si l'espècie vegetal és susceptible de ser induïda per l'agent en qüestió, ja que la inducció de resistència depèn de la planta.

Recomanacions

- Alternar més de dos gens de resistència diferents per evitar la selecció de virulència i disminuir la densitat de població del nematode a nivells que no causin pèrdues de producció.
- Utilitzar inductors de resistència com a eina complementària per al control del nematode en cultius que no disposen de gens específics de resistència, o, en aquells que en disposen, per disminuir la possibilitat de seleccionar poblacions virulentes.
- Utilitzar la resistència vegetal en el marc d'una estratègia de gestió integrada, ja que l'ús de resistència específica a un determinat gènere o espècies de nematodes fitoparàsits pot induir canvis en la comunitat de nematodes i substituir els gèneres i/o espècies causants dels problemes.

05. Referències

- García, H.; Sorribas, F. J. 2021. Effect of *Citrullus amarus* accessions on the population dynamics of *Meloidogyne incognita* and *M. javanica* and watermelon yield. *Scientia horticulturae* 275. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109680>
- Sorribas, F.; Djan, C.; Mateille, T. 2020. Nematodes. Integrated pest and disease management in greenhouse crops. pp. 147-174. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22304-5_5
- Giné, A.; Escudero, N.; Sorribas, F. J. 2020. Control de enfermedades de plantas causadas por nematodos. *Fitopatología* 5: 28-34. <https://sef.es/sites/default/files/publicacions/fitopatologiaSEFn5.pdf>
- Expósito, A.; Pujola, M.; Achaerandio, I., *et al.* 2020. Tomato and melon *Meloidogyne* resistant rootstocks improve crop yield but melon fruit quality is influenced by the cropping season. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.560024>

- Ghahremani, Z.; Escudero, N.; Beltran, D., *et al.* 2020. *Bacillus firmus* strain I-1582, a nematode antagonist by itself and through the plant. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00796>
- Pocurull, M.; Fullana, A.; Ferro, M., *et al.* 2020. Commercial formulations of *Trichoderma* induce systemic plant resistance to *Meloidogyne incognita* in tomato and the effect is additive to that of the *Mi-1.2* resistance gene. *Frontiers in microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.03042>.
- Ghahremani, Z.; Escudero, N.; Saus, E., *et al.* 2019. *Pochonia chlamydosporia* induces plant-dependent systemic resistance to *Meloidogyne incognita*. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00945>
- Expósito, A.; Garcia, S.; Giné, A., *et al.* 2018. *Cucumis metuliferus* reduces *Meloidogyne incognita* virulence against the *Mi1.2* resistance gene in a tomato–melon rotation sequence. *Pest Management Science*. 75-7, <https://doi.org/10.1002/ps.5297>
- Expósito, A.; Munera, M.; Giné, A., *et al.* 2018. *Cucumis metuliferus* is resistant to root-knot nematode *Mi1.2* gene (a)virulent isolates and a promising melon rootstock. *Plant Pathology*. <https://doi.org/10.1111/ppa.12815>
- García-Mendivil, H.; Munera, M.; Giné, A., *et al.* 2018. Response of two *Citrullus amarus* accessions to isolates of three species of *Meloidogyne* and their graft compatibility with watermelon Crop protection. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.02.005>
- Giné, A.; Sorribas, F. J. 2017. Quantitative approach for the early detection of selection for virulence of *Meloidogyne incognita* on resistant tomato in plastic greenhouses. *Plant Pathology* 66:1338-1344. <https://doi.org/10.1111/ppa.12679>
- Verdejo-Lucas, S.; Cortada, L.; Sorribas, F. J., *et al.* 2009. Selection of virulent populations of *Meloidogyne javanica* by repeated cultivation of *mi* resistance gene tomato rootstocks under field conditions. *Plant Pathology* 58: 990-998. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02089.x>
- Talavera, M.; Verdejo-Lucas, S.; Ornat, C., *et al.* 2009. Crop rotations with *Mi* gene resistant and susceptible tomato cultivars for management of root-knot nematodes in plastic houses. *Crop Protection* 28: 662-667. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.03.015>

Agraïments

Al Ministerio de Economía y Competitividad, Ministerio de Ciencia e Innovación i els Fons FEDER per finançar els projectes AGL2013-49040-C2-1-R i AGL2017-89785-R, i la beca FPI PRE2018-084265 a A. Fullana. També agraïm el suport i la col·laboració de socis i tècnics de les ADV d'horta i del Servei de Protecció dels Vegetals de la Generalitat de Catalunya.

Autors:

A. Fullana, A. Expósito, H. García-Mendivil, N. Escudero, A. Giné i F. J. Sorribas

Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia. Universitat Politècnica de Catalunya

A/e: francesc.xavier.sorribas@upc.edu