

Fita, A. ● Nuez, F. ● Pico, B.

ADAPTACIÓN DEL SISTEMA RADICULAR DE MELÓN (*Cucumis melo* L.) FRENTE A LA DEFICIENCIA EN FÓSFORO

Instituto de Conservación y
Mejora de la Agrobiodiversidad
Valenciana,
Universitat Politècnica de València

Introducción

El fósforo (P) es un elemento limitante para el crecimiento de las plantas. Más del 30% de las tierras arables del planeta requieren de la aplicación externa de fertilizantes fosforados para ser productivas. Esto es debido fundamentalmente a que el P es poco difusible en el suelo y suele encontrarse fijado junto a iones Ca, Fe y Al, o formando parte de moléculas orgánicas. Ninguna de estas formas de P es asimilable por las plantas, que fundamentalmente lo adquieren en forma de iones ortofosfato (H_2PO_4^-) de la solución del suelo, en la que se encuentra a bajas concentraciones (Vance *et al.*, 2003).

La dificultad en la adquisición de fósforo ha provocado que muchas especies vegetales hayan desarrollado numerosos mecanismos de adaptación frente a la escasez de este elemento, entre los que destacan: I) simbiosis con micorrizas, II) secreción de aniones al medio, III) cambio de la arquitectura radicular (respuesta plástica), que les permita explorar de forma más eficiente las capas superficiales del suelo (López-Bucio *et al.*, 2003). Esta respuesta plástica

del sistema radicular es extrema en algunas plantas adaptadas a suelos muy pobres, las cuales han desarrollado un tipo de raíz especial llamada raíz en escobilla o 'cluster roots'. Estas adaptaciones, además, son variables dentro de especie, existiendo genotipos mejor adaptados a la deficiencia en fósforo y con una mayor respuesta plástica. Identificar esta variación dentro de cada especie es fundamental para desarrollar variedades que requieran menos insumos de fertilizantes. Una mejora de la adquisición de P en las plantas cultivadas: I) permitiría el cultivo en zonas pobres, dónde se concentran la mayoría de suelos infértiles y dónde el uso de fertilizantes es un problema económico, y II) permitiría reducir el uso de fertilizantes inorgánicos, suponiendo una ventaja económica y ecológica en los países desarrollados (Cordell *et al.* 2009; Lynch, 2007).

El melón (*Cucumis melo* L.) es una especie enormemente variable. Se divide en dos subespecies, subsp. *melo* y subsp. *agrestis*. La primera incluye mayoritariamente tipos cultivados, fundamentalmente los cultivares de tipo español, pertenecientes a la variedad *inodorus*, y los de tipo cantalupo, pertenecientes a la variedad *cantalupensis* y *reticulatus*, aunque también incluye algunos tipos de menor interés comercial, como las variedades *flexuosus* o *chate*, y tipos exóticos menos conocidos en nuestros mercados, perte-

necientes a las variedades *ameri*, *chandalack*, *adana* etc, procedentes de Europa de este, Norte de África, Oriente Próximo y Asia (Pitrat, 2008). La subsp. *agrestis*, por otro lado, incluye mayoritariamente tipos exóticos cultivados, procedentes de la India y Lejano Oriente, Asia Central y África, y germoplasma silvestre o semi-silvestre, perteneciente a varias variedades botánicas, *agrestis*, *conomon*, *momordica*, *chinesis*, *makuwa*, etc.

Esta enorme diversidad se manifiesta en una gran variabilidad de características de fruto, de mucho interés para la diversificación de mercados, y para la mejora de la calidad de las variedades comerciales, pero también se manifiesta en variación en la estructura de la planta y de la raíz. La variabilidad genética para la arquitectura de la raíz ha sido estudiada con detalle entre dos accesiones pertenecientes a la subsp. *agrestis* y a la subsp. *melo* respectivamente. A partir de estos genotipos se han descrito incluso QTLs que controlan características favorables de la raíz (Fita *et al.* 2004; 2006; 2008a). Sin embargo, no existen estudios sobre la diversidad existente para el conjunto de la especie frente a la deficiencia en fósforo. El objetivo del presente trabajo es estudiar la variación natural en la respuesta de raíces de melón a la deficiencia al fósforo.

Metodología

Como material vegetal se seleccionaron 9 accesiones de melón (Tabla 1), pertenecientes a una colección representativa de la variabilidad genética de la especie, procedentes de la colección nuclear del grupo de Mejora Genética de Cucurbitáceas del COMAV de la Universidad Politécnica de Valencia (COMAV-UPV).

Para observar la respuesta plástica de las raíces ante la falta de P se evaluaron 10 plántulas de cada genotipo en dos tratamientos alternativos: I) solución nutritiva completa (Control) compuesta por 3 mM de KNO_3 , 2mM de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0,5 mM de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,5 mM de $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, 25 μM de KCl , 12,5 μM de H_3BO_3 , 1 μM de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 1 μM de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,25 μM de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 1,3 μM de $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 25 μM de Fe-NaEDTA ; II) solución nutritiva sin fósforo P (NoP), en la cual se sustituían los 0,5mM de $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ por 0,5 mM de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Las plantas crecieron durante 12 días en un sistema hidropónico con soporte de papel, que permite la observación de la arquitectura radicular (Fig. 1) (Fita *et al.*, 2008b).

Los parámetros evaluados fueron: I) peso de la parte aérea (PA, mg) y la raíz (PR, mg), calculándose la biomasa como suma de ambas y el ratio (PR/PA), II) longitud total de la raíz (LT, cm), III) longitud de la raíz principal (LP, cm), y IV) longitud total de raíces laterales (LL, cm). Los parámetros de longitud de raíz se determinaron escaneando las raíces, procesando las imágenes manualmente para diferenciar raíz principal de laterales y analizándolas con el programa WinRhizo Pro 2003 (Regent Instruments Inc, Canada). La imagen completa de la raíz se dividió en dos mitades (parte superior e inferior) para determinar el porcentaje de longitud de la raíz alojado en la parte superior de la misma. Por

último, se contó el número de raíces laterales (NL) y se tomaron anotaciones sobre la ocurrencia de cambios aparentes en la arquitectura radicular entre tratamientos.

Resultados

En condiciones de ausencia de estrés nutricional se encontró variación en la estructura del sistema radicular entre los distintos genotipos. El tipo de raíz más observado es el denominado triangular, donde la longitud de las raíces laterales va disminuyendo a lo largo de la raíz principal (Fig. 1). Sin embargo, también aparecieron morfologías típicamente rectangulares, donde las raíces laterales se distribuyen con longitud similar a lo largo de la raíz principal, siendo más frecuente este tipo en las accesiones de la subsp. *agrestis* como las entradas de tipo silvestre o exóticas cultivadas, procedentes de China, Japón y la India.

En condiciones de deficiencia de fósforo se observó una gran diversidad de respuestas. En general, y dado el estadio temprano de desarrollo en el que se caracterizaron las plantas, no se observaron diferencias significativas en la biomasa total entre el tratamiento sin P y el control (Tabla 1). Sin embargo, sí que se encontraron diferencias en la

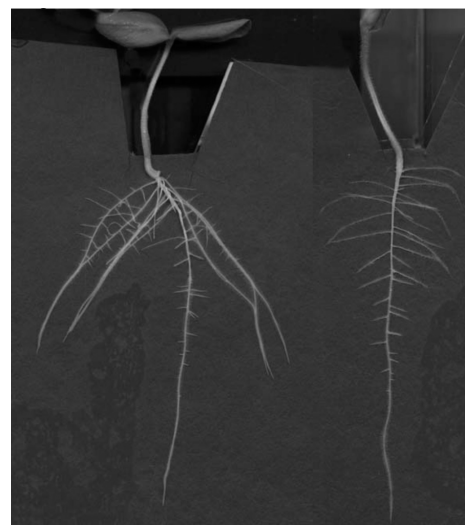


Figura 1. Diferencias en la estructura de la raíz de distintas accesiones de *C. melo* cultivadas en solución control. Izquierda: estructura triangular, predominante en los cultivares de la subsp. *melo*. Derecha: estructura rectangular típica de las entradas de la subsp. *agrestis*.

distribución de la biomasa en la planta, observándose en algunos genotipos un aumento significativo en la proporción de biomasa correspondiente a la raíz. El incremento más pronunciado fue el del tipo *flexuosus* de Turquía que pasó de un ratio peso de raíz/parte aérea (PR/PA) de 0,35 en el control a un ratio de 0,52 en NoP. Las entradas que mostraron valores más elevados de esta relación en el tratamiento control, *momordica* de la India, el tipo *chate* Carosello y la variedad Dulce, perteneciente al tipo *reticulatus* 0,65, 0,44

Tabla 1. Valores de biomasa total y su distribución relativa entre la raíz y la parte aérea. Comparación entre valores para el tratamiento control (C) y el tratamiento deficiente en P (NoP). Cada valor es la media de 10 plantas.

Tipo	Origen	Accesión	Biomasa (mg)		Peso raíz vs peso parte aérea	
			C	NoP	C	NoP
Subsp. <i>agrestis</i>						
<i>agrestis</i>	China	Guo Gua	146	158	0,22	0,33*
<i>makuwa</i>	Japón	Yamato Purinsu	345	386	0,30	0,38*
<i>momordica</i>	India	Kharbuja	383	318	0,65	0,67
Subsp. <i>melo</i>						
<i>chate</i>	Italia	Carosello	707	856	0,44	0,41
<i>flexuosus</i>	Turquía	Acuk	493	397	0,35	0,52*
<i>cantalupensis</i>	Francia	Noir des Carmes	257	259	0,32	0,33
<i>reticulatus</i>	USA	Dulce	233	210	0,63	0,47
<i>inodorus</i>	España	Piel de sapo	360	396	0,18	0,26*
<i>inodorus</i>	España	Tendral	574	540	0,36	0,47*

* Indica diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre la media en el tratamiento control y el deficiente en fósforo.

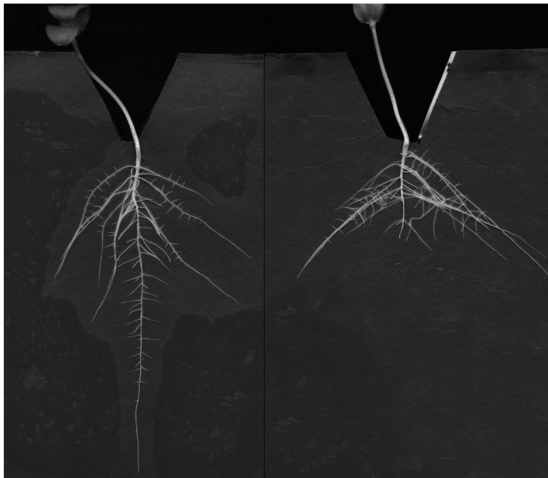


Figura 2. Reducción de la longitud de la raíz principal en condiciones de deficiencia en P en el genotipo *inodorus* Tendral. Izquierda: tratamiento control. Derecha: tratamiento deficiente en P.

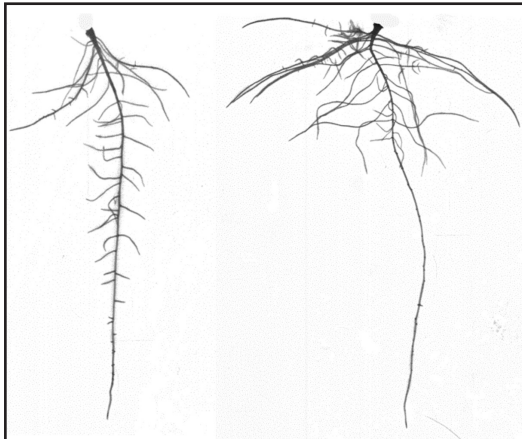


Figura 3. Respuesta plástica de la entrada *flexuosus* Acuk de Turquía por la que se invierte más recursos de la raíz en las capas superficiales del suelo. Izquierda: tratamiento control. Derecha: tratamiento deficiente en P.

y 0,63 respectivamente, no mostraron diferencias significativas en PR/PA entre los dos tratamientos. Esto puede ser debido a que estas entradas no necesitan reajustar su PR/PA ratio, pues es ya de por sí elevado. Cabe destacar que el tipo Piel de sapo fue el que presentó una menor relación PR/PA, bastante inferior al otro cultivar español de tipo Tendral, aunque ésta se incrementó ligeramente en ausencia de P.

La modificación de distribución de la biomasa fue acompañada de un cambio en la arquitectura de raíz. Esta respuesta plástica fue variable

Tabla 2. Valores de diversos parámetros de la arquitectura de raíz. Comparación entre valores para el tratamiento control (C) y el tratamiento deficiente en P (NoP). Cada valor es la media de 10 plantas.

Accesión	Longitud principal (cm)		Longitud laterales (cm)		Número de laterales		Longitud en mitad superior	
	C	NoP	C	NoP	C	NoP	C	NoP
subsp. <i>agrestis</i>								
Guo Gua	6,30	5,96	17,97	24,99*	23,3	23,8	0,58	0,75*
Yamato Purinsu	9,90	8,28	32,93	82,8*	39,0	30,0*	0,67	0,67
Kharbuja	22,16	21,93	95,56	78,10	59,0	58,0	0,83	0,85
subsp. <i>melo</i>								
Carosello	21,37	15,10*	127,95	164,03*	57,3	50,3	0,78	0,83*
Acuk	13,64	11,04	59,86	66,15	45,5	42,8	0,85	0,89*
Noir des Carmes	6,50	7,23	26,26	33,09*	36,3	36,3	0,82	0,86
Dulce	10,91	4,36*	50,93	35,57	38,8	35,6	0,79	0,78
Piel de sapo	8,76	6,09	34,65	44,40*	40,0	36,8	0,81	0,86*
Tendral	13,23	6,74*	66,54	90,58*	43,2	23,5*	0,80	0,88*

* Indica diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre la media en el tratamiento control y el deficiente en fósforo.

en las entradas evaluadas (Tabla 2). Un efecto de reducción en el crecimiento de la raíz principal se pudo observar en 8 de las nueve accesiones, aunque sólo fue estadísticamente significativo en 3 de ellas (Fig. 2). Por otro lado, 6 accesiones mostraron un aumento significativo de la longitud de las raíces laterales. Este incremento fue variable, mientras que en algunas accesiones fue discreto, del orden del 25% de la longitud de laterales en el tratamiento control en la variedad *cantalupensis* Noir des Carmes, en otras, como la entrada japonesa de la subsp. *agrestis* Yamato Purinsu, aumentó 2,5 veces la longitud de las laterales en NoP con respecto del control.

El aumento en la longitud de las raíces laterales no fue uniforme a lo largo de la raíz principal, concentrándose en la mayoría de las accesiones preferentemente en la parte superior del sistema radicular (Tabla 2; Fig.3). Por otro lado, este incremento de longitud no fue acompañado de un aumento en el número de laterales, que en la mayoría de los casos se mantuvo constante. La única accesión que no mostró diferencias en cuanto a la longitud de laterales, número o distribución fue el cultivar Dulce del tipo *reticulatus*,

mostrándose como una de las accesiones con menor respuesta plástica a la deficiencia de fósforo.

Discusión

El método empleado nos ha permitido observar diferencias entre los distintos tipos de melón en la estructura radicular y en su respuesta frente a la deficiencia en fósforo. Se ha encontrado una estructura radicular de partida diferencial entre las accesiones de la subsp. *agrestis*, más rectangulares, y las de la subsp. *melo* más triangulares. Una estructura triangular es típica de tipos cultivados, adaptados a sistemas de elevados insumos, donde un aprovechamiento inmediato de los recursos se consigue explorando rápidamente las capas más superficiales del suelo. Por otro lado, las estructuras rectangulares son más adecuadas en suelos pobres, donde la planta puede competir buscando recursos en capas más profundas. Aunque esta configuración de partida parece no influir en el tipo de respuesta frente a la deficiencia en fósforo, sí que podría ser de interés para la mejora de otros caracteres, como la tolerancia a la sequía o a otros estreses (Picó *et al.*, 2007).

La modificación del balance de biomasa entre raíz y parte aérea también se ha descrito como un mecanismo que contribuye a la tolerancia frente a distintos tipos de estrés abiótico del suelo, como la deficiencia en nutrientes. Esta respuesta implica que la planta destina sus recursos a desarrollar la raíz, en lugar de la parte aérea, para tener posibilidades de explorar un mayor volumen de suelo captando más nutrientes. El tipo Piel de sapo, el más importante en nuestros mercados, parece ser el que presenta un mayor desequilibrio, destinando la mayor parte de los recursos al desarrollo de la parte aérea y aunque responde redistribuyendo recursos a la raíz en condiciones de deficiencia de P, todavía es el cultivar que presenta un menor valor PR/PA. Este comportamiento es coherente con el de un cultivar seleccionado por su producción en condiciones de abundancia de nutrientes.

La variación encontrada para el ratio PR/PA en la colección de melón podría tener interés en la mejora. Sin embargo, mejorar para un mayor ratio PR/PA puede repercutir en pérdidas de producción, ya que la raíz estaría actuando como sumidero de recursos de la planta. En este sentido, se deberían seleccionar los genotipos que tuvieran un mínimo de biomasa de raíz en condiciones de abundancia de nutrientes, pero que fueran capaces de responder muy bien a las condiciones de escasez, como es el caso del tipo *flexuosus* de Turquía Acuk. De los tipos españoles merece la pena destacar el comportamiento del tipo Tendral con un ratio PR/PA superior al de Piel de sapo y una mejor respuesta en condiciones de deficiencia. Las variedades indicadas pertenecen a la subsp. *melo* y se encuentran genéticamente cercanas a otros cultivares españoles de tipo *inodorus*, por lo que su uso en mejora sería más sencillo que el empleo de los tipos de la subsp. *agrestis*.

Una respuesta plástica típica descrita para la deficiencia en fósforo es que la raíz principal deje de crecer, aumentando la densidad y elongación de las raíces laterales, también se han descrito cambios en el ángulo de crecimiento de las raíces laterales para que éstas queden más horizontales, formando en consecuencia sistemas radiculares superficiales y muy ramificados. Este tipo de respuesta tiene su justificación en la baja movilidad del P en el suelo, que hace que las capas más ricas en este mineral se encuentren en la parte superior del mismo. Estas capas son ricas en materia orgánica que pueden ir liberando P bajo la acción de ácidos orgánicos liberados por la planta (Lynch y Brown, 2001). Nuestro estudio constata que si bien todas las entradas mostraron algún tipo de respuesta plástica a la falta de P, no todas mostraron el mismo tipo de respuesta ni con la misma intensidad, demostrando la variación genética en cuanto a la adaptación a la deficiencia en P en *C. melo*. La detención o la ralentización del crecimiento de la raíz principal sólo fueron significativas en 3 accesiones de la subsp. *melo*. Por otro lado, seis accesiones incrementaron la longitud de laterales y/o aumentaron preferencialmente la longitud en la mitad superior del sistema radicular. Las accesiones con una mayor respuesta se adaptarán mejor a la escasez de P, entre éstas cabe destacar el melón tipo *chate* Carosello por su incremento en longitud y el tipo *inodorus* Tendral por su gran plasticidad en todos los parámetros estudiados. En este sentido, la accesión que peor adaptación mostró fue el tipo *reticulatus* Dulce.

Conclusiones

Los resultados demuestran la variabilidad, tanto en la arquitectura de raíz en condiciones normales, como en la respuesta plástica a la deficiencia en fósforo de las entradas de melón estudiadas. Las entradas

de la subsp. *agrestis*, y algunos grupos botánicos de la subsp. *melo* con entradas más rústicas, como el tipo *flexuosus* y *chate*, muestran una respuesta muy marcada a la deficiencia en fósforo. Para los grupos de melones cultivados las tipologías de respuesta son más diversas, pero existe variación, tanto en el grupo *inodorus* como en el grupo *cantalupensis* y *reticulatus*, que resulta de interés para la mejora de los tipos cultivados.

Agradecimientos

Los trabajos realizados han sido parcialmente financiados por el proyecto INIARF2008-00003-C02-02 y por el proyecto ERANETGEN2006-27773-C2-2.

Bibliografía

- Cordell, D., Drangert, J. and White, S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 19, 292-305.
- Fita A., Picó B., Nuez F. 2004. Estudio de la genética de parámetros de raíz en melón (*Cucumis melo* L.). *Actas de Horticultura*, 41, 211-213.
- Fita, A., Pico, B. and Nuez, F. 2006. Implications of the genetics of root structure in melon breeding. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 131, 372-379.
- Fita, A., Pico, B., Monforte, A.J. and Nuez, F. 2008a. Genetics of root system architecture using near-isogenic lines of melon. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 133, 448-458.
- Fita, A., Postma J., Picó B., Nuez F., and Lynch J. 2008b. Root architecture variation in Cucurbita. *Cucurbitaceae 2008. Proceedings of the IX EUCARPIA Meeting on Genetics and breeding of Cucurbitaceae.* (Ed: M. Pitrat) pp: 487-491.
- Lopez-Bucio, J., Cruz-Ramirez, A. and Herrera-Estrella, L. 2003. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6, 280-287.
- Lynch, J.P. and Brown, K.M. 2001. Topsoil foraging - an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant Soil* 237, 225-237.
- Lynch, J.P. 2007. Roots of the second green revolution. *Aust. J. Bot.* 55, 493-512.
- Pitrat, M. 2008. Melon (*Cucumis melo* L.). In: Prohens J, Nuez F (eds) *Handbook of Plant Breeding. Vegetables I.* Springer, New York, pp: 287-314.
- Picó, B., Fita, A. and Nuez, F. 2007. Using genetics to improve stress resistance through altering root architecture. *Journal Cab Reviews* 53, 1 - 16.
- Vance, C.P., Uhde-Stone, C. and Allan, D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytol.* 157, 423-447.