

Enigmas de la raíz: la parte oculta de la planta

Joseph G. Dubrovsky y Svetlana Shishkova

Una leyenda mexicana dice que el hombre fue hecho de maíz. El ciclo de vida de esta planta fue conocido por los pueblos que habitaban este territorio desde hace 5 a 7 mil años. Los teotihuacanos conocieron los órganos principales de las plantas: el tallo, la hoja, la flor y la raíz (**figura 1**) y pensaron en cómo una planta se desarrolla y da fruto. Sin embargo, hasta ahora desconocemos mucho sobre el funcionamiento de los órganos de las plantas, sobre todo de la raíz, que es un órgano subterráneo. En este capítulo veremos qué sabemos y qué no sabemos sobre la raíz de las plantas, sobre su funcionamiento y sobre algunos usos que el ser humano hace de ella.

Sabemos que la raíz es un órgano de vital importancia para la vida de la planta. La parte aérea de la planta, que contiene los tallos y hojas, tiene un papel importante para la producción de nutrimentos orgánicos como resultado del proceso de fotosíntesis. Estos compuestos orgánicos, a los que llamamos fotosintatos, se necesitan tanto para construir todos los órganos de la planta, como para obtener la energía para los procesos vitales. Como los fotosintatos no se producen en la raíz, tienen que ser transportados desde la parte aérea. Por otro lado, se requieren dióxido de carbono y agua para el

proceso de la fotosíntesis en la parte aérea de la planta, mientras que las sales, o nutrimentos minerales, se requieren para convertir los productos de la fotosíntesis en otros compuestos orgánicos, tanto en la parte aérea de la planta como en la raíz. La absorción de agua y sales, así como su transporte a la parte aérea, son las funciones más importantes de la raíz. Las plantas no pueden caminar y buscar estos recursos, por ende, para cumplir con su función la raíz tiene que “aprender” a extenderse y a formar nuevas raíces. Estos son los enigmas más importantes que a su vez generan muchas preguntas más. Vamos a abordar primeramente cómo se extiende la raíz.

Enigma 1. La actividad del meristemo apical de la raíz

Después de la germinación de una semilla, la raíz se desarrolla a partir de un órgano embrionario que se llama *radícula*. Cuando la radícula sale de la semilla y crece se le llama *raíz primaria*. En las primeras etapas de la germinación, la raíz primaria crece debido solamente a que sus células se alargan. Sin embargo, si todas las células se alargaran sin que produjeran nuevas células, la raíz no podría seguir creciendo.



FIGURA 1



Figura 1.
Fragmento de un mural de Teotihuacan,
Museo de Antropología, México D.F.

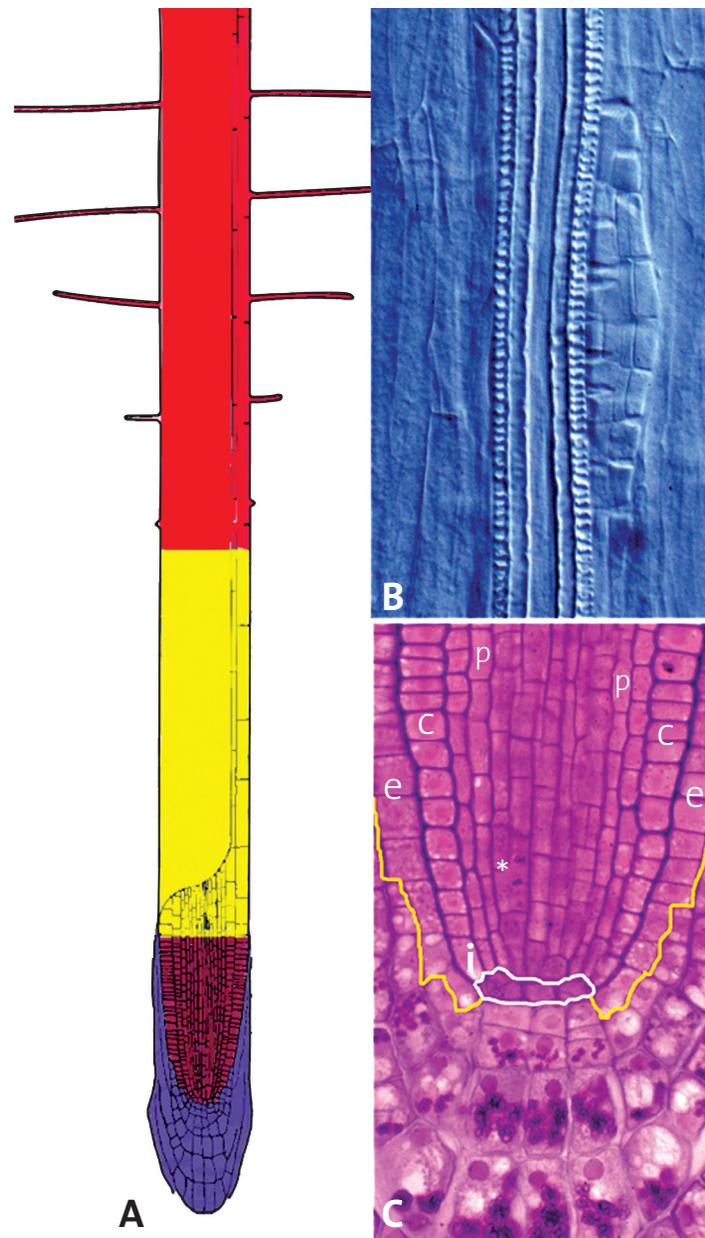


Figura 2.

Estructura de la raíz. (A) Esquema general de las zonas de la raíz. Cofia (morado), meristemo apical (vino), zona de elongación (amarillo) y zona de diferenciación con pelos radicales (rojo). (B) El primordio de la raíz lateral desarrollado en el periciclo dentro de la zona de diferenciación. (C) Microfotografía de campo claro de corte histológico (2 micrómetros de grosor) de la región apical de la raíz. Las células adentro de la línea blanca son células del centro quiescente. Al exterior y abajo de la línea amarilla se encuentra la cofia de la raíz. Arriba de la línea amarilla se encuentra el meristemo apical. Técnica de aclaración de la raíz completa observada con la óptica del contraste diferencial de interferencias. Las minúsculas significan e: epidermis, c: córtex, p: periciclo, i: célula inicial del córtex. El asterisco indica una célula en división.

Entonces la pregunta es: ¿Cómo mantiene la raíz el proceso de crecimiento? La respuesta nos permitirá entender cómo la raíz sigue aumentando su tamaño por tiempos largos para cumplir sus funciones de captar y transportar el agua y las sales minerales del suelo.

La punta o el ápice de la raíz es un sitio donde las células se multiplican a través del proceso de división celular llamado *mitosis* y es por eso que esta región se llama *meristemo* (del griego *meris*, división) *apical* de la raíz (**figura 2**). Entonces, el meristemo es la porción apical de la raíz, en donde se producen las células debido a la división celular y donde la actividad mitótica se mantiene permanentemente. El meristemo está protegido por una estructura que se llama *cofia* (**figura 2**). Un poco más arriba del meristemo se encuentra la zona de elongación; en esta zona las células ya no se dividen, sino que se alargan. Gracias a este proceso la raíz aumenta su tamaño. Cuando estas células llegan a su tamaño final, salen de la zona de elongación y entran a otra zona de la raíz que se llama de diferenciación o maduración (**figura 2**). Ahí las células obtienen las características que les permiten llevar a cabo diversas funciones. Aparentemente, todo es simple: las células en el meristemo se dividen, dando origen a nuevas células, las que empiezan a crecer rápido y participan en el crecimiento de la raíz. Sin embargo, en este proceso vital hay muchas cosas que hay que saber bien para entender cómo la raíz crece.

¿Qué cosas debemos saber? Entre mayor sea el número de células que se dividen en el meristemo, mayor será el número de células que pueden ser producidas, de esta forma, la raíz va a crecer más rápido. Sin embargo, no sabemos mucho sobre la regulación del mantenimiento del meristemo. ¿Cómo está determinado el tamaño del meristemo apical? ¿Por qué en algunas etapas del desarrollo el meristemo es más grande y en otras más pequeño? ¿Qué factores participan en la transición de las células de la zona meristemática a la zona de elongación rápida? Estas preguntas todavía esperan respuesta.

¿Cómo se regula el mantenimiento del meristemo en general? El análisis del meristemo

apical de la raíz demuestra que consiste de células que se dividen frecuentemente. Además, en la parte más apical del meristemo existe un grupo de células que se dividen con una frecuencia 10 a 15 veces menor que otras células del meristemo. Este conjunto de células con divisiones infrecuentes se llama *centro quiescente* (**figura 2**). Cuando una célula del centro quiescente se divide y da origen a dos células hijas, una de ellas se queda en el centro quiescente y la otra se convierte en una célula inicial. Después de que una célula inicial se divide N veces en el meristemo, se forma una hilera de 2^N células nuevas, que se van alejando del centro quiescente y acercando a la zona de elongación. Cuando las células llegan al borde de las zonas meristemática y de elongación, algunas señales hasta ahora desconocidas les “ordenan” detener la división y empezar a alargarse. ¿Cuál es la importancia biológica de la existencia del centro quiescente? Sabemos que en cualquier proceso biológico, por ejemplo, en la duplicación de moléculas de ADN antes de la división celular, o en la separación de los cromosomas durante la división, pueden ocurrir errores. Entre más veces se divide una célula, mayor es la probabilidad de que ocurran los errores de este tipo y de que estos pasen a las células nuevas, afectando el funcionamiento de la raíz. Si en las raíces de las plantas no se guardara un reservorio de células que se dividen muy raramente para dar origen a las células que se dividen rápido, la probabilidad de tener raíces con funcionamiento alterado sería más alta.

Una función importante del centro quiescente es reprimir la diferenciación de las células del meristemo: cuando las células del centro quiescente de la planta *Arabidopsis thaliana* se eliminan usando rayos láser, las células meristemáticas adyacentes no se dividen y, en lugar de esto, se diferencian. Un poco más adelante veremos que en la pitaya agria, una planta cactácea, la raíz primaria crece solamente unos días y el centro quiescente no se establece. En esta planta la ausencia del centro quiescente inicialmente no impide la división de células del meristemo y no induce la diferenciación de las

células adyacentes, como en *arabidopsis*, sino resulta en la desaparición del meristemo pocos días después de la germinación.

Enigma 2. El agotamiento del meristemo de la raíz en algunas cactáceas del desierto de Sonora

Las raíces de muchas plantas crecen por periodos prolongados. Sin embargo, en algunas cactáceas del desierto de Sonora, la raíz primaria crece solamente unos días después de la germinación. En algunas especies, como la pitaya agria *Stenocereus gummosus*, o la biznaga *Ferocactus peninsulæ*, la raíz primaria sigue aumentando su tamaño por dos o tres días después de la germinación. En otras especies, como el cardón *Pachycereus pringlei*, la raíz primaria crece de siete a nueve días. En este tiempo el meristemo empieza a hacerse más pequeño y al final desaparece por completo o, como se dice, “se agota”. Como consecuencia de esto, la zona de elongación desaparece también y todas las células de la punta de la raíz se diferencian. Las células diferenciadas de la capa más externa de la raíz desarrollan pelos radicales; este hecho nos permite visualizar fácilmente la zona de la raíz que contiene células diferenciadas. En las raíces que tienen las zonas meristemática y de elongación, las células diferenciadas con pelos radicales se encuentran a cierta distancia de la punta de la raíz (**figura 2**); cuando las raíces de cactáceas ya no crecen, los pelos radicales cubren toda la punta (**figura 3**). Este tipo de crecimiento, que llamamos *crecimiento determinado*, es una adaptación a las condiciones del desierto, porque la terminación del crecimiento de la raíz primaria induce el desarrollo de las raíces laterales. Como resultado, el sistema radical se desarrolla rápidamente, lo que permite a las plántulas jóvenes aprovechar el agua, que en condiciones desérticas es un recurso muy limitado. No sabemos cuáles son los mecanismos que regulan este tipo de crecimiento.

Como se ha mencionado, el centro quiescente es importante para el funcionamiento del meristemo y las células del centro quies-

cente se dividen con mucha menos frecuencia que otras células del meristemo. Existen compuestos que pueden “marcar” a las moléculas de ADN cuando éstas se duplican antes de la división celular. Usando dichos compuestos, encontramos que en la raíz primaria de la pitaya agria el centro quiescente no se establece durante los dos o tres días que dura su desarrollo. En cambio, en la raíz primaria del cardón, que crece por más tiempo, el centro quiescente se establece solamente en la etapa inicial de desarrollo y luego desaparece. ¿Qué señales podrían contribuir al proceso del agotamiento del meristemo y de la diferenciación de células de la punta de la raíz? Todavía no lo sabemos. Si pudiéramos identificar algunos genes que funcionan en los meristemas, cuando la raíz todavía crece, y que dejan de funcionar cuando la raíz deja de crecer, podríamos averiguar si estos genes están de alguna forma involucrados en el crecimiento determinado de la raíz. Una de las estrategias para investigar su papel en este proceso es inducir su expresión o “apagar” estos genes en raíces transgénicas (las células, órganos u organismos transgénicos son aquellos que contienen genes foráneos, introducidos mediante el uso de alguna técnica de transformación genética). Por ejemplo, si “apagamos” el gen que proporciona las señales para inducir el crecimiento determinado, esperamos revertir este tipo de crecimiento. Para poder analizar el tipo de crecimiento de las raíces transgénicas de las cactáceas, estamos desarrollando un sistema artificial de regeneración de raíces a partir de *callos*. El callo es un grupo de células con alto potencial de división, que puede formarse cuando los fragmentos aislados de órganos de planta se cultivan en un medio en condiciones estériles. Dos clases de hormonas vegetales, o fitohormonas, las auxinas y las citocininas, son muy importantes para estos procesos. Generalmente, si dejamos un fragmento de un órgano vegetal en un medio de cultivo con altas concentraciones de auxinas y citocininas, estas células empiezan a dividirse y se forma un callo. Si transferimos los callos a medios de cultivo con concentraciones altas de citocininas y bajas de

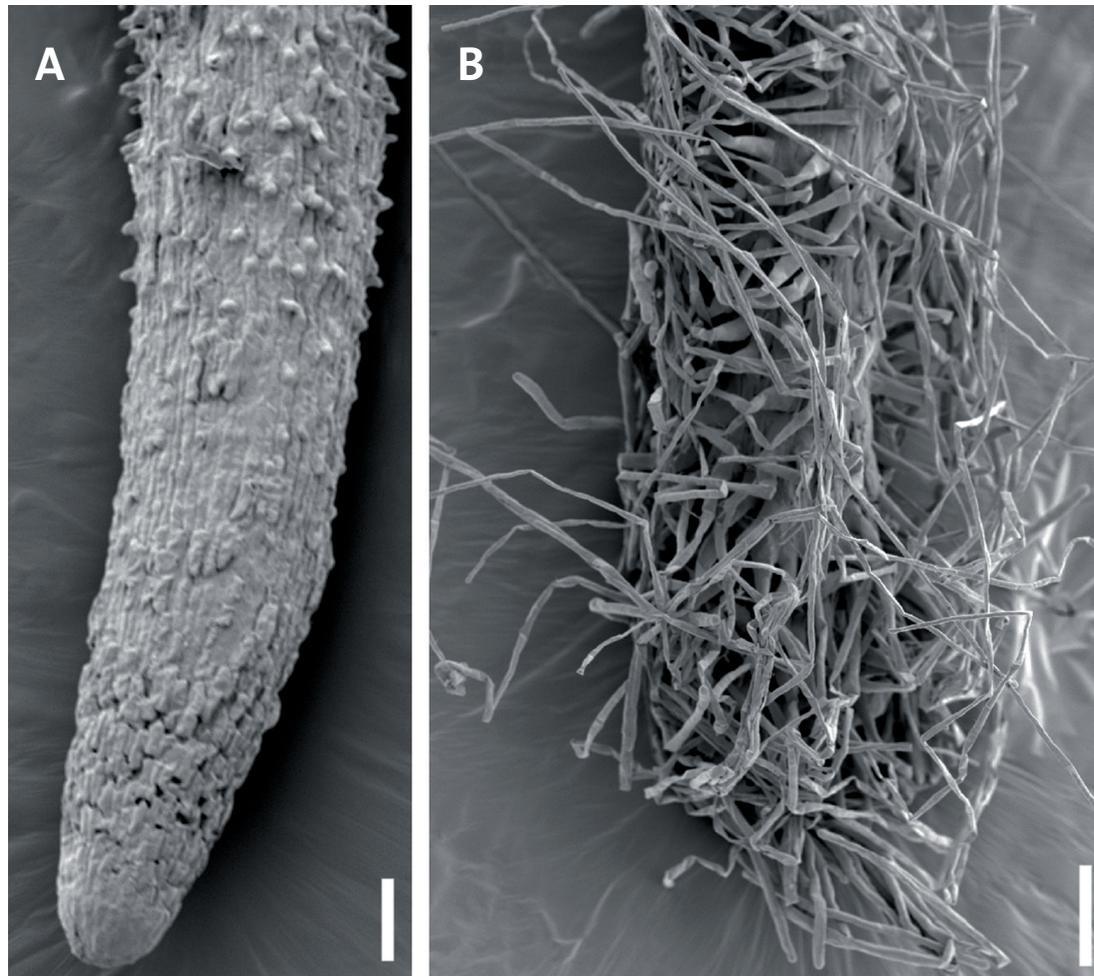


Figura 3.
Fotos de la raíz primaria de *Stenocereus gummosus* tomada con microscopía electrónica de barrido. (A) Un día después de la germinación (nótense los pelos radicales jóvenes en parte basal de la raíz). (B) Dos días después de la germinación (nótense que los pelos radicales cubren completamente la punta de la raíz).

auxinas, podemos regenerar yemas y brotes. Si en lugar de lo anterior, transferimos los callos a otros medios de cultivo con concentraciones altas de auxinas y bajas de citocininas, podemos regenerar raíces. Aprovechamos este conocimiento para obtener raíces regeneradas a partir de los callos de cactáceas (figura 4) y encontramos que, como esperábamos, estas raíces tienen el mismo patrón determinado de crecimiento que la raíz primaria. Entonces, si logramos transferir los genes que nos interesan a los callos y regenerar raíces de estos callos, podremos analizar el papel de los genes de interés en el crecimiento determinado de la raíz.

Para transferir genes al ADN de las células vegetales estamos usando un ingeniero genético “natural”: las bacterias del género *Agrobacterium*, que desde hace muchísimo tiempo saben transferir algunos de sus genes a los cromosomas de plantas. En la naturaleza, *Agrobacterium tumefaciens* puede infectar a una planta que ha sufrido una herida y transferir algunos de sus genes al ADN de la planta, entre los cuales se encuentran genes de síntesis de auxinas y citocininas. Como resultado, las células de la planta que “adquirieron” estos genes, empiezan a dividirse de manera similar a las células que están en medios de cultivo con auxinas y citocininas. Así, en la planta se forma un tumor o *agalla*. Otros genes que también se transfieren inducen a la planta a sintetizar algunos compuestos, que sólo pueden ser utilizados por las bacterias como nutrientes, pero no por la planta misma. Modificando el fragmento de ADN que se transfiere de la bacteria a la planta, se pueden insertar al ADN de la planta los genes de nuestro interés sin que se desarrolle el tumor. Estamos en el proceso de establecer un método experimental para obtener callos transformados mediante *Agrobacterium tumefaciens*, y regenerar raíces a partir de estos callos que contengan los genes ajenos. Analizando así el papel de varios genes en el crecimiento determinado de la raíz, sabremos más sobre el mecanismo del agotamiento del meristemo apical. Esto nos ayudaría a entender por qué en muchas especies el meriste-

mo apical de la raíz se mantiene por tiempos prolongados, y en algunas otras especies el meristemo desaparece. Este conocimiento ayudaría a diseñar en el futuro plantas de interés agrícola que desarrollen sistemas radicales mejor adaptados a las condiciones particulares de los suelos, climas, sistemas de riego, etc. donde se cultive la planta.

Enigma 3. Formación de nuevas raíces

Una raíz puede alcanzar horizontes impresionantes creciendo más de 10 m alrededor de la planta en el suelo cercano a la superficie (algunas cactáceas), o crecer hasta 100 m de profundidad para llegar a los niveles de los mantos freáticos (el mezquite, por ejemplo). Sin embargo, a pesar de esta capacidad, el potencial de captar agua y sales minerales de una raíz es muy bajo y no suficiente para toda la planta. Es por eso que durante la evolución de las plantas, se desarrolló un mecanismo para aumentar la superficie de la raíz a través de la formación de nuevas raíces a partir de la raíz primaria o de otras raíces. Una sola planta puede formar muchas raíces nuevas, llamadas *laterales*, a partir de otras raíces. Una planta de centeno, por ejemplo, produjo en sólo cuatro meses 13 millones 815 mil 672 raíces laterales. Obviamente, toda esta masa de raíces es más eficiente que una sola raíz para explorar el espacio alrededor de la planta. En cualquiera raíz en crecimiento de cualquier planta viva constantemente se están formando nuevas raíces laterales.

El enigma sobre la formación de nuevas raíces tiene muchas preguntas, cuyas respuestas apenas empezamos a entender. Responder cabalmente estas preguntas, es el interés de nuestros estudios. ¿Cómo se forma una nueva raíz? ¿Qué células y cuántas de ellas participan en la formación de un primordio (grupo de células en una etapa temprana de desarrollo de la raíz lateral)? Las células que dan origen a la nueva raíz, se llaman *células fundadoras*. No sabemos cómo estas células se especifican y qué diferencias tienen en comparación con otras células del mismo tejido. ¿Dónde se especifi-



Figura 4.
Callos de *Ferocactus peninsulae* con raíces regeneradas.

can? ¿Qué señales son importantes para esto? ¿Cómo percibe la raíz las señales ambientales e internas para empezar el proceso de iniciación de la nueva raíz lateral? ¿Qué genes de la planta están involucrados en los procesos de iniciación de la formación de raíces? ¿Qué genes están involucrados en el control de la morfogénesis del primordio? ¿Cómo se activa el meristemo de una nueva raíz recién formada? ¿De qué depende el crecimiento de las raíces laterales formadas y cómo la planta puede regular el tamaño y la arquitectura de todo el sistema radical? Estas y otras preguntas más son componentes de este enigma. Estamos estudiando algunas de estas preguntas con las herramientas de la biotecnología vegetal.

Una de tales herramientas es el uso de plantas transgénicas. Una línea transgénica llamada J0121, de la planta modelo *Arabidopsis thaliana*, expresa un gen de medusa que codifica para una proteína verde fluorescente solamente en las células que dan origen a los primordios de las raíces laterales. Por lo tanto, se puede usar esta línea para el análisis de los procesos celulares de la iniciación de primordios de raíces laterales. En la **figura 5** podemos ver una micrografía en la que las células del tejido interno llamado periciclo, adyacentes al xilema, emiten fluorescencia verde. Es interesante que las células en esta posición son las únicas competentes para formar el primordio. Otras células del periciclo nunca dan origen al primordio. No sabemos a qué se debe este fenómeno. ¿Por qué algunas células son capaces, y otras no, de dar origen a una raíz nueva?

La inducción, selección y análisis de mutantes puede ser muy útil para saber qué genes están involucrados en el control y la regulación de las raíces laterales. Las mutaciones son cambios en la secuencia de ADN que se pueden inducir usando por ejemplo algunos compuestos químicos llamados *mutágenos*. En nuestro laboratorio se analizó el sistema radical de más de 17 000 plantas que se obtuvieron después de un tratamiento con un mutágeno. Encontramos varias mutantes con alteraciones en el desarrollo del sistema radical. El análisis celu-

lar de estas mutantes nos permitirá entender qué procesos del desarrollo están afectados en cada una. Además, el mapeo genético de cada mutación nos ayudará identificar el gen afectado, lo que permitirá saber cuál es su función y su papel en el desarrollo de la raíz. En la **figura 6** podemos ver como ejemplo tres mutantes afectadas en el desarrollo de la raíz lateral. La primera de ellas tiene pocas raíces laterales (**figura 6A**), lo que sugiere que el gen afectado está involucrado en el desarrollo de las raíces laterales. En la raíz de otra mutante (**figura 6B₁** y **6B₂**) podemos ver que el primordio de la raíz lateral es anormal. Entonces, el gen afectado en esta mutante se requiere para la formación del primordio y para el mantenimiento de la actividad del meristemo. Cuando este gen está mutado, ocurre la diferenciación temprana de los tejidos del primordio. En la tercera mutante (**figura 6C**), los primordios se desarrollan muy lentamente y la morfogénesis es anormal. Por lo tanto, el gen afectado en esta mutante aparentemente está involucrado en la regulación de la morfogénesis del primordio. Todas estas mutaciones están en proceso de mapeo genético para poder aislar los genes afectados. Varias de las otras mutantes tendrán que esperar su turno. Todavía hay mucho que hacer en este campo.

Cómo podemos usar el conocimiento adquirido sobre biología de la raíz en biotecnología

Como mencionamos anteriormente, hasta la fecha existe poca información sobre el control celular y molecular de la iniciación y el desarrollo de las raíces laterales. La iniciación es el proceso central del desarrollo de todo el sistema radical. Si podemos responder a varias de las preguntas planteadas anteriormente, entenderemos más acerca de los mecanismos del desarrollo del sistema radical en plantas. Este conocimiento ayudará en el diseño y/o control de la arquitectura radical en las plantas. Particularmente, saber cómo se regula el desarrollo del sistema radical en cultivos agrícolas es una

meta a mediano plazo, que puede mejorar las prácticas de manejo de ecosistemas agrícolas y ajustar cada cultivo a sus condiciones de crecimiento particulares. Por lo tanto, la comprensión de las bases celulares y moleculares de la iniciación y el desarrollo de las raíces laterales tiene un gran impacto sobre la futura investigación aplicada a la agricultura, reforestación, fitorremediación y otros campos.

Vamos a ilustrar cómo nuestro conocimiento puede ser usado en las prácticas de fitorremediación, y qué preguntas tenemos que responder para aplicar nuevas tecnologías en el campo. La fitorremediación representa una tecnología para la restauración del medio ambiente mediante el uso de plantas.

La presencia de metales pesados en el ambiente es un serio problema para el bienestar de los ecosistemas y la salud humana. En EE.UU. se gastan dos mil millones de dólares al año para la remediación, es decir la descontaminación de agua de mantos freáticos que contienen metales pesados. El mayor porcentaje de la contaminación viene de la industria minera. Usar plantas para limpiar áreas contaminadas (fitorremediación), además de eliminar la contaminación, tiene otro efecto importante: los metales acumulados en los tejidos vegetales pueden ser recuperados y reciclados. Existen especies de plantas, llamadas hiperacumuladoras, capaces de almacenar concentraciones altas de metales pesados. Algunas pueden acumular más de 0.1% de su peso seco de plomo, cobalto y cromo, otras más de 1% de manganeso, níquel o zinc en sus tejidos, creciendo en su hábitat natural.

En México existen varios sitios afectados por el deshecho inadecuado de residuos peligrosos: San Luis Potosí (arsénico), Baja California (plomo), Sonora (cadmio), Guanajuato y Estado de México (cromo), entre otros (Instituto Mexicano de Ecología, http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/126/rp_estado.html?id_pub=126&id_tema=7&dir=Consultas). En México las zonas áridas y semiáridas ocupan la mayor parte del territorio (casi 70%) y, como la mayoría de plantas hiperacumuladoras de metales son especies de zonas templadas, su

uso en gran parte de México es prácticamente imposible. Sin embargo, en nuestro laboratorio estamos desarrollando una estrategia alternativa que permitirá usar raíces de plantas hiperacumuladoras a escala biotecnológica.

La idea principal es utilizar no la planta completa, sino el cultivo de raíces de especies hiperacumuladoras de metales para fitorremediación de aguas y suelos contaminados por metales pesados. El cultivo de raíces pilosas inducidas por la bacteria *Agrobacterium rhizogenes* favorece el incremento en las tasas de crecimiento de la raíz.

Las raíces pilosas se forman en plantas como resultado de la infección por *Agrobacterium rhizogenes*, pariente de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*. Se llaman pilosas porque se desarrollan de manera abundante y forman una masa de raíces parecida a pelos. Cuando la bacteria coloniza algún tejido de la planta que ha sufrido una lesión, ya sea por la acción de un insecto u otra causa, un fragmento de ADN de la bacteria se integra al genoma de la planta, como lo vimos para *Agrobacterium tumefaciens*. La diferencia entre la enfermedad de agallas, que induce *Agrobacterium tumefaciens* y la enfermedad de raíces pilosas, que induce *Agrobacterium rhizogenes*, está en que se transfiere un juego diferente de genes a las células vegetales. En el laboratorio nosotros podemos inducir la formación de raíces pilosas experimentalmente haciendo heridas en los tejidos de la planta e inoculando en ese sitio la bacteria. Las raíces inducidas se cultivan *in vitro* en medio sólido y posteriormente en medio líquido (**figura 7**) y así podrían ser usadas a escala más amplia. Las características más importantes del cultivo de raíces pilosas son las altas tasas de crecimiento, la estabilidad genética y bioquímica durante el cultivo y la capacidad de crecer sin hormonas adicionadas al medio. Existen datos que indican que los cultivos de raíces pilosas de especies hiperacumuladoras mantienen una actividad de bioacumulación de metales de hasta 6% de su peso seco.

En nuestro laboratorio establecimos los cultivos de las raíces pilosas de seis diferen-

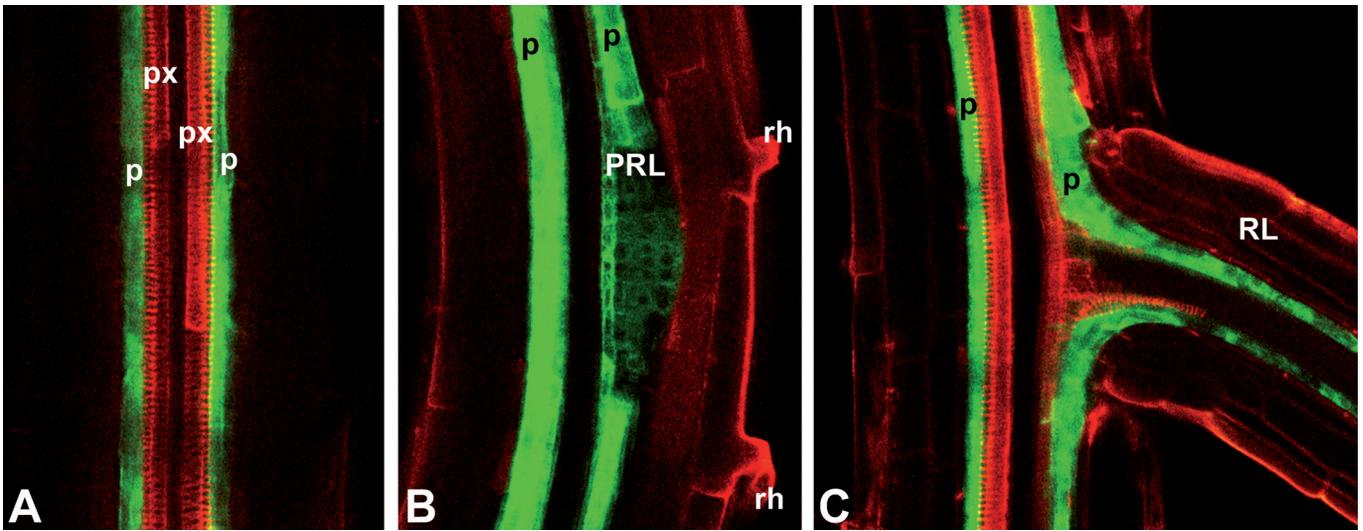


Figura 5. Formación de la raíz lateral en la zona de diferenciación en la línea transgénica J0121. (A) Las células con fluorescencia verde son las del periciclo (p), competentes para formar el primordio de la raíz lateral. Estas células están en contacto con tejido de protoxilema (px) involucrado en el transporte de agua y compuestos minerales hacia la parte aérea de la planta. (B) Células competentes de periciclo (p) forman el primordio de la raíz lateral (PRL); (rh) pelos radicales. (C) En etapas posteriores del desarrollo, el primordio aumenta su tamaño y rompe los tejidos externos de la raíz. Como resultado la raíz lateral (RL) emerge. Las raíces fueron tratadas con un compuesto fluorescente llamado rojo neutro y observadas en el microscopio láser confocal de barrido. Esta herramienta poderosa permite observar la raíz viva y sin la necesidad de hacer cortes histológicos.

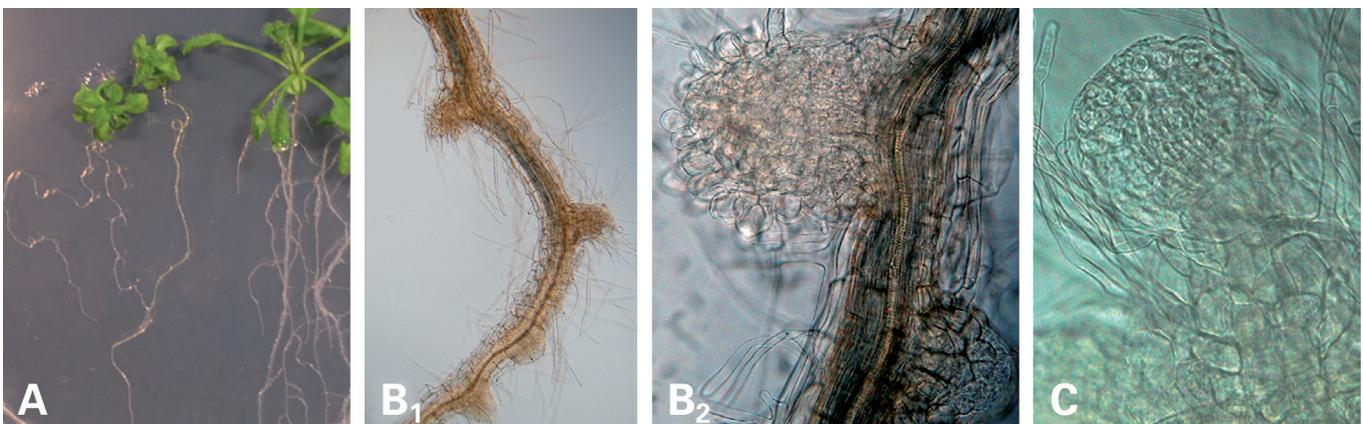


Figura 6. Fenotipo de mutantes afectadas en el desarrollo de la raíz. (A) La primera mutante desarrolla pocas raíces laterales. Las dos plantas de la izquierda son mutantes y la planta en el lado derecho es del tipo silvestre. (B₁) Raíz primaria de la segunda mutante con las raíces laterales detenidas en su desarrollo. (B₂) Raíz lateral que demuestra el crecimiento detenido. (C) La raíz de la tercera mutante con el desarrollo anormal de la raíz lateral recientemente emergida; los pelos radicales son de la raíz primaria; la mayoría de los primordios anormales no emergen o emergen muy lentamente en esta mutante.

tes especies hiperacumuladoras. Encontramos que algunas de ellas tienen muy alta tolerancia a metales pesados: hasta 160 veces mayor de la cantidad de metal permisible por La Norma Oficial Mexicana. Nuestra meta es saber qué especies son más resistentes en cultivo de raíces pilosas a concentraciones altas de metales tóxicos presentes en aguas residuales. Hasta ahora no existe ningún estudio que muestre si los cultivos de raíces pilosas de plantas hiperacumuladoras de metales sobreviven cuando están expuestas a una mezcla de metales en concentraciones tóxicas. Las aguas residuales de la industria minera normalmente contienen mezclas de metales tóxicos en altas concentraciones. Por lo tanto, planeamos estudiar cuáles especies tienen mayor supervivencia de sus raíces pilosas en cultivo en presencia de una mez-

cla de diferentes metales tóxicos, y analizar las cantidades de metales acumulados en la raíz, así como los coeficientes de bioacumulación.

El conocimiento sobre la posibilidad de cultivar raíces pilosas de plantas hiperacumuladoras a una escala más amplia, y posteriormente utilizarlas en condiciones ambientales, permitirá el uso de raíces pilosas de plantas hiperacumuladoras de metales para la biorremediación de áreas contaminadas, aguas residuales industriales y para la prevención de contaminación de suelos. Esperamos que con base en los cultivos establecidos y sabiendo cómo se regula el crecimiento de la raíz y la formación de nuevas raíces, podremos elaborar algunas recomendaciones de cómo usar los cultivos de raíces pilosas para crear filtros biológicos que puedan utilizarse en zonas áridas y semiáridas. ●



Figura 7.

Cultivo en medio líquido de las raíces pilosas de *Arabidopsis halleri*, una planta hiperacumuladora de cadmio y zinc.