



Sección a cargo de Enrique Galindo (enrique.galindo@ibt.unam.mx)

El trabajo científico, incluyendo el de diversos campos de la biotecnología, tiene una evolución muy dinámica: surgen nuevos temas, se encuentran otros problemas; teorías y evidencias se contrastan y todo transita hacia nuevas áreas, concatenándose para formar redes de conocimiento que, mejor arti-

culadas, impulsan el desarrollo económico, social y cultural. En esta sección se presentan aportaciones y temas pioneros, de actualidad o emergentes y de interés general, por colaboradores locales y de otras instituciones.

Nanotecnología

AL RESCATE DE LA AGRICULTURA: NANOFUNGICIDAS Y NANOFERTILIZANTES

Sofía Basurto Cereceda, Daniel López Lima, Arturo I. Martínez Enríquez y Nicolaza Pariona Mendoza

El uso de fertilizantes y plaguicidas en la agricultura hoy en día es una práctica común para lograr los mejores rendimientos posibles de productos alimentarios, textiles, agroindustriales, etc. Sin embargo, las principales desventajas que presentan los llamados agroquímicos, son sus altos costos de producción —desde la perspectiva económica y ambiental—, y su baja efectividad relativa. Esto se ha traducido en la utilización de grandes cantidades de insumos que en su mayoría terminan filtrándose y contaminando los suelos y los cuerpos de agua subterráneos (y luego eutroficación), y asimismo, en la pérdida de diversidad de la fauna benéfica. Además, el uso de grandes cantidades de plaguicidas favorece la generación de resistencia en los organismos plagas de los cultivos. Por ello, existe la necesidad de desarrollar métodos alternativos que sean más compatibles con el ambiente, que se utilicen en pequeñas dosis, que sean más asimilables y no generen resistencia.

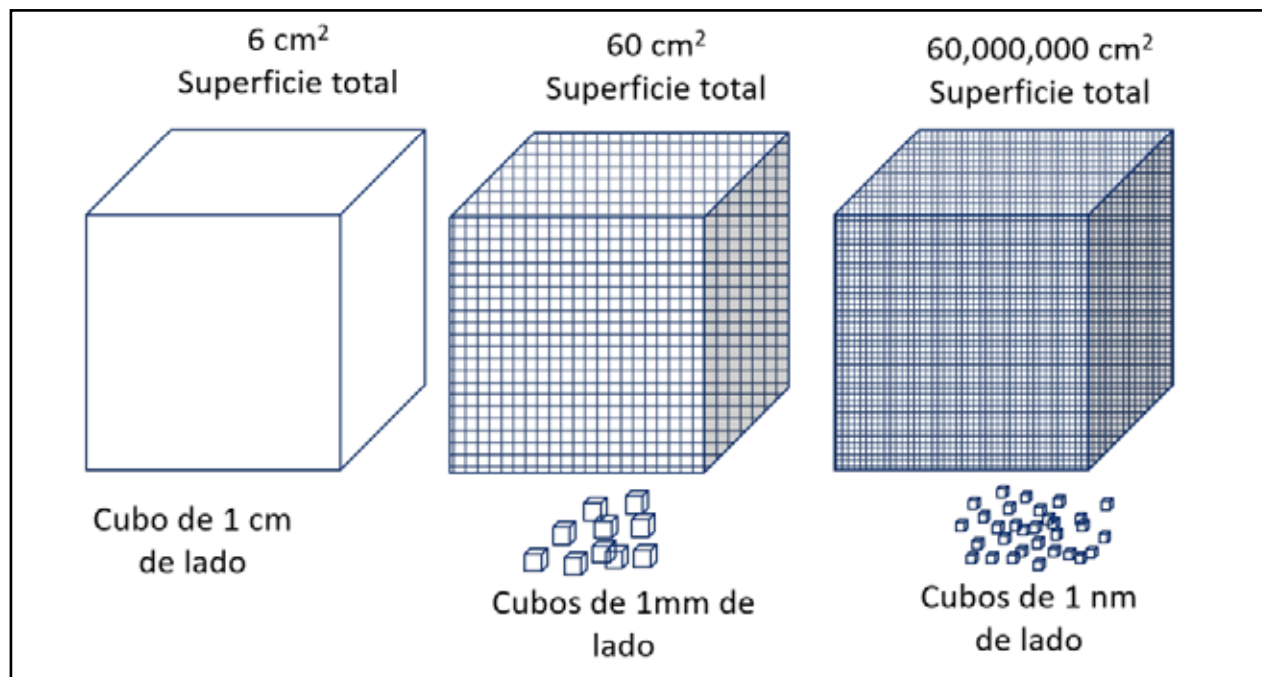


Nanociencia y nanotecnología en todos lados

Con el gran avance actual en la generación y aplicación del conocimiento científico, junto al mejor acceso a la información, probablemente buena parte de la población está familiarizada, o al menos ha escuchado la palabra 'nanotecnología'. El significado etimológico habla de un concepto o estudio de productos diminutos (*nanos*= enano); esta raíz también describe unidades de medida en dimensiones de milmillonésimas (10^{-9}) de metro, gramo o segundo. Considerando la dimensión 'tamaño', una manera práctica de visualizarlo sería la siguiente: la relación que guarda un nanómetro (nm) con un metro lineal, es la misma que guarda un balón de fútbol, con el planeta Tierra. Por lo tanto, la nanotecnología hace referencia al estudio de los materiales que tienen tamaños de 1 a 100 nanómetros aproximadamente. Lo interesante



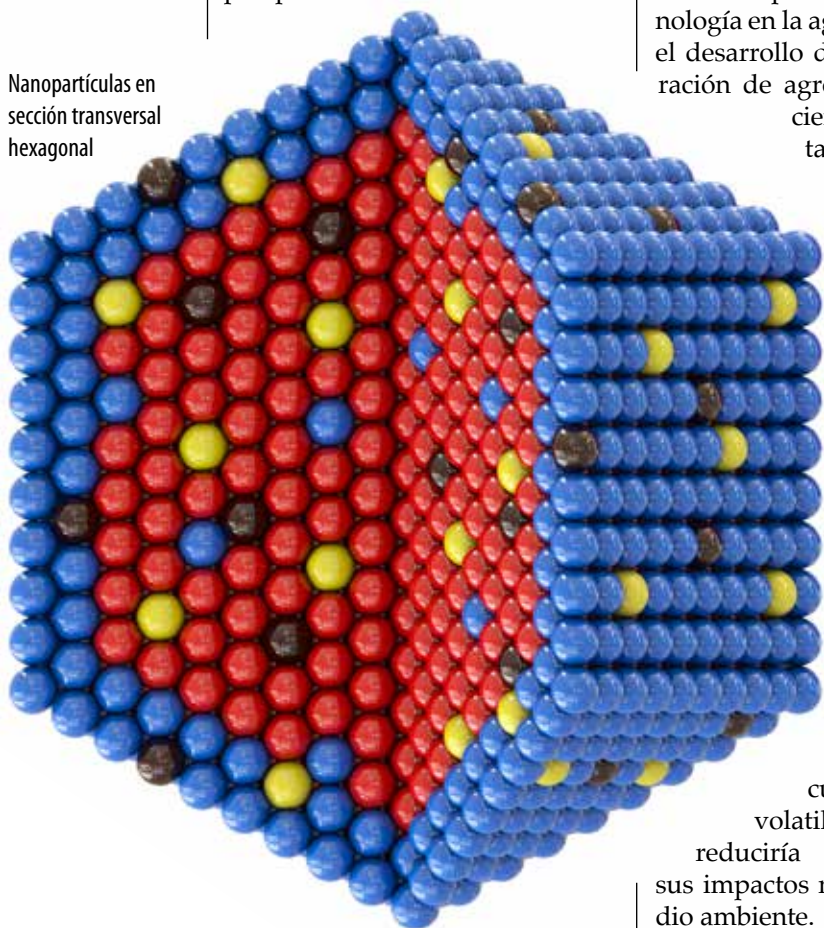
Figura 1. Efecto del aumento de la superficie en función del tamaño de una partícula. Un cubo de un 1 cm lado, tiene una superficie de 6 cm^2 ; si se divide en cubos de 1 mm, el conjunto tendrá una superficie de 60 cm^2 , y si cada cubito se divide para tener 1 nm de lado, la superficie total se incrementará a 60 millones de cm^2 (equivalente a un cuadrado de $24.5 \times 24.5\text{ m} = 600\text{ m}^2$)
Adaptado de: <https://www.nano.gov/nanotech-101/special>.



es que, a esta escala, los materiales exhiben propiedades y fenómenos totalmente nuevos; por ejemplo, en su reactividad química, en su conductividad eléctrica, en sus propiedades magnéticas y en efectos ópticos [1]. Estas nuevas propiedades han

llamado la atención en diversas áreas de investigación tal como la medicina (ver *BiotechMov* No. 23, 18-21), electrónica, ciencias ambientales, aeronáutica, y actualmente está generando interés del sector agrícola. Aquí reseñamos como la aplicación de la nanotecnología en la agricultura permitirá el desarrollo de una nueva generación de agroquímicos más eficientes y menos contaminantes para la

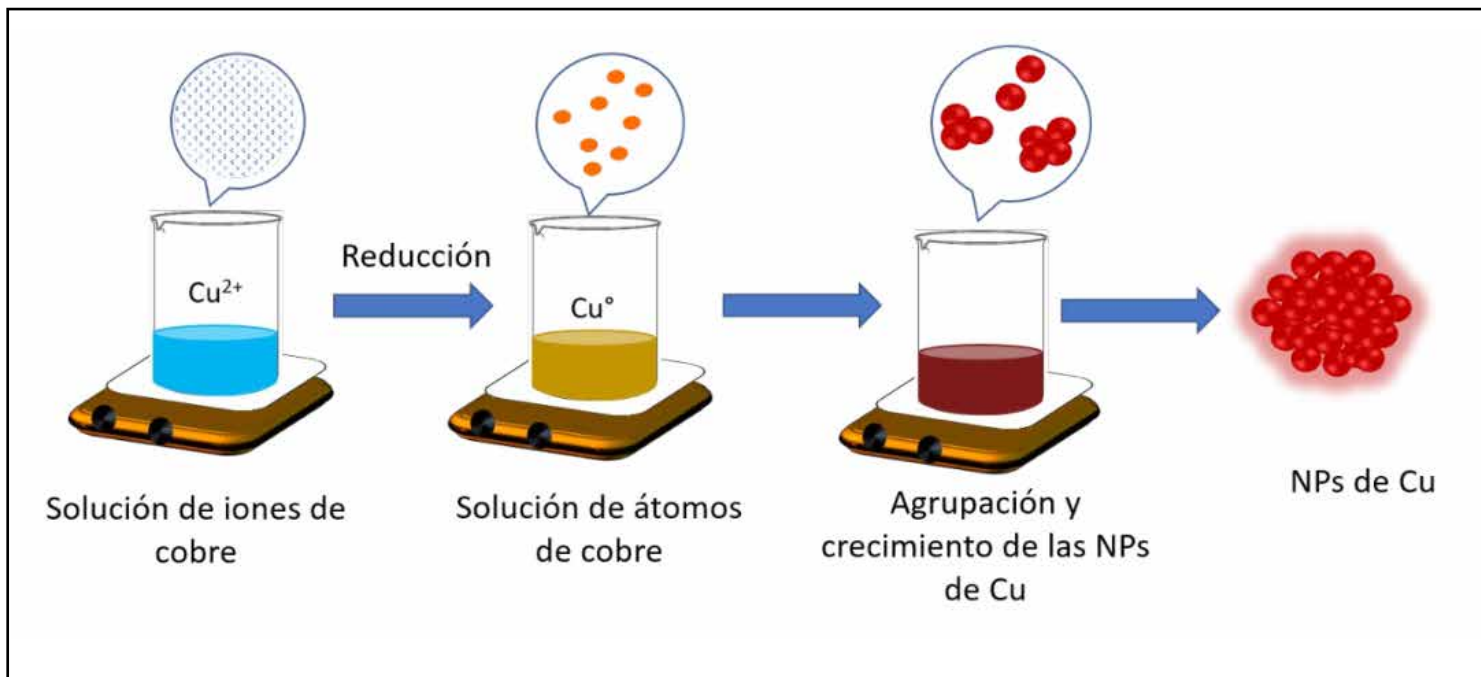
Nanopartículas en sección transversal hexagonal



protección vegetal y fertilización. El objetivo de esta tecnología es que los nanomateriales, como agroquímicos, puedan ayudar a reducir las dosis de aplicación en las plantas y el suelo, así como evitar pérdidas por degradación, lixiviación, escorrentía (agua de lluvia que circula en un terreno), volatilización, etc., lo que reduciría significativamente sus impactos negativos en el medio ambiente.

Tecnologías con nanopartículas

Una nanopartícula se compone de unos pocos a varios miles de átomos. Lo extraordinario de estas nanopartículas (NPs) es que su relación entre el área y el volumen (superficie específica) es muy elevada y esta relación se incrementa cuando el diámetro de la nanopartícula se reduce. Este efecto se percibe mejor gráficamente [Fig. 1]. El tamaño de las nanopartículas, que pueden ser esféricas, cúbicas, octaedros, y su composición química (de Fe, Cu, Zn, Ag u otros), determinan en conjunto las propiedades físicas, químicas y biológicas de las NPs, que, por consiguiente, se utilizan cada vez más en productos comerciales y de consumo, incluidos semiconductores, microelectrónica, catalizadores, productos domésticos de uso diario (cosméticos y protectores solares) y medicinas. Para la obtención de las NPs, se parte de una solución conteniendo iones del metal deseado (p. ej., con sulfato de cobre), en el que se adiciona un agente reductor para obtener átomos libres del metal; luego se da el agrupamiento de estos átomos en forma de racimos dando origen a las NPs [Fig. 2].



Las investigaciones de la aplicación de las NPs en la agricultura —a la cual podemos llamar agro-nanotecnología— ha tomado impulso en la última década. Esta tecnología tiene el potencial de mejorar los sistemas convencionales de producción de cultivos y con ello lograr un desarrollo sostenible de la producción agrícola con impactos ambientales reducidos. Las NPs pueden ser usadas como agro-químicos de liberación controlada (por ejemplo, nanofertilizantes, nanopesticidas y nanoherbicidas), así como nanosensores (dispositivos que ayudan a detectar algunos tipos de estrés biótico o abiótico, antes de que puedan afectar la producción), o nuevas técnicas de manipulación genética que incrementan la eficiencia de los programas de fitomejoramiento.

Nutrición vegetal y fertilidad

El rendimiento y sostenibilidad de los agroecosistemas depende, además del aporte indispensable de luz solar, del suministro equilibrado de nutrientes disponibles para las plantas, los cuales deben incluirse en las prácticas y tecnologías de cultivo. Las plantas requieren, para su correcto desarrollo, un total de 17 nutrientes

conteniendo elementos químicos en diferentes concentraciones y compuestos. De los 17 elementos esenciales para las plantas, se consideran los tres primeros: carbono, oxígeno e hidrógeno (C, H, O), que son de origen no mineral —se obtienen del aire y del agua—, y 14 de origen mineral. Los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio (N, P, K) se requieren en cantidades relativamente altas y se incluyen en las formulaciones tradicionales (estiércol, guano, abono verde, compostas) o bien industriales (fertilizantes ‘químicos’). Los 11 elementos restantes se denominan micro-nutrientes [Tabla 1], debido a que las plantas los utilizan en menores cantidades; sin embargo, son esenciales para cumplir con diversas funciones metabólicas como la formación de clorofila y la asimilación de macro-nutrientes. Estos elementos comúnmente se encuentran disponibles en el suelo. Sin embargo, en suelos agrícolas es común que se requieran mayores cantidades de las disponibles de manera natural. Por esto, se adicionan complementos minerales, incluyendo las trazas contenidas en el agua de riego, o como en el caso de la hidroponía, en las soluciones nutritivas que se aplican a los cultivos. No obstante, las ne-

cesidades nutricionales varían dependiendo del tipo de planta, su etapa de desarrollo y el producto que se busca obtener (tubérculos, flores, frutos, follaje etc.).

¿Cómo funcionan los nanofungicidas y nanofertilizantes?

Se han estudiado una variedad de NPs y se ha demostrado que las NPs basadas en Zn, Cu, Fe y sus óxidos (Cu , CuO , Cu_2O , Fe_xO_x , ZnO , ZnO_2) brindan un beneficio a las plantas, inhibiendo a varios microorganismos fitopatógenos, a la vez que suministran micronutrientes esenciales. Las NPs de óxidos metálicos son agentes antifúngicos que se utilizan en la pintura de edificios, materiales de construcción, plásticos y textiles. Actualmente, para evitar la pérdida de cultivos agrícolas por infecciones de hongos patógenos, se aplican extensivamente algunos fungicidas como imidazoles y triazoles, los cuales han generado efectos negativos sobre el ambiente, además de promover resistencia en varias plagas de importancia. Desde 1927 se ha utilizado el cobre como fungicida, debido a que en semillas cubiertas de sulfato de cobre (CuSO_4) se inhibe el crecimiento de hongos, y ahora

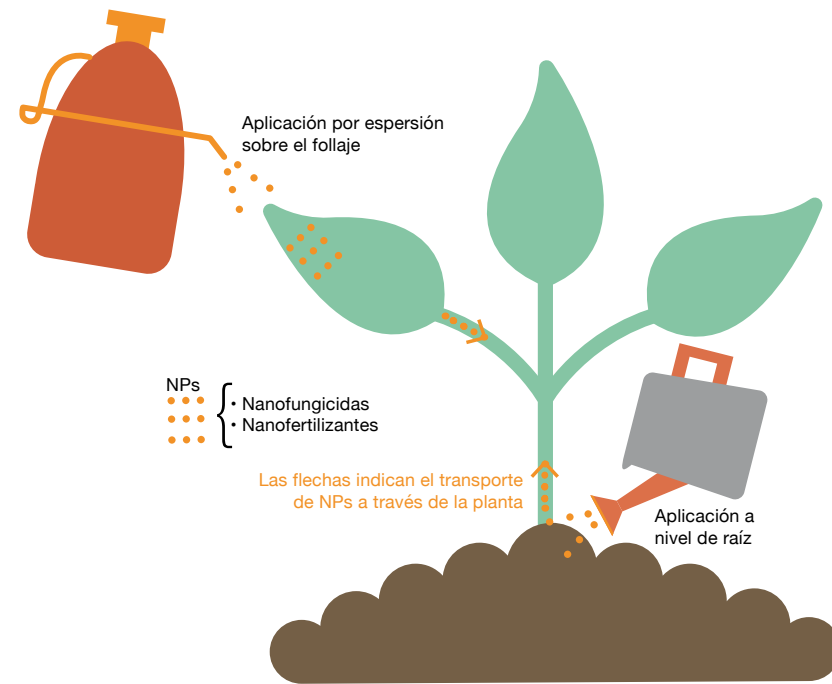
Figura 2. Proceso de preparación de nanopartículas de cobre. Los ‘racimos’ al final miden entre 10-100 nm

Tabla 1. Elementos químicos y compuestos nutrientes que son necesarios para el crecimiento y desarrollo vegetal.

Nombre del elemento	Símbolo químico	Formas químicas o compuestos aprovechables por las plantas	Funciones principales en la planta
Calcio	Ca	Como cationes hidrosolubles $[Ca^{+2}]$, en sales como carbonato, sulfato	Crecimiento de raíz, calidad de fruto, rigidez e impermeabilidad de la cáscara de frutos
Magnesio	Mg	Como cationes hidrosolubles $[Mg^{+2}]$, en sales como carbonato, sulfato	Formación de clorofila, fijación de CO_2 durante la fotosíntesis, síntesis de proteínas
Azufre	S	En sales, como anión hidrosoluble $([SO_4]^{+2}/$ sulfato)	Formación de clorofila, formación de proteínas y aceites en oleaginosas, indispensable en el metabolismo del nitrógeno por lo que influye en la formación de biomasa.
Boro	B	Forma elemental	Estabilidad de las paredes celulares, desarrollo del fruto y semillas, transporte de azúcares, fijación de nitrógeno.
Cloro	Cl	Como iones hidrosolubles $[Cl^{-1}]$	Fotosíntesis, apertura y cierre de estomas (ayuda a evitar la deshidratación), multiplicación celular en raíces y hojas, supresión de enfermedades foliares.
Cobre	Cu	En forma metálica $[Cu^0]$, como óxido $[CuO]$, hidróxido $[Cu(OH)_2]$, o sales de cobre $[CuSO_4]$	Formación de aminoácidos, componente importante de los cloroplastos, formación de pared celular, coloración y sabor de frutos.
Hierro (fierro)	Fe	Como ión metálico Fe III $[Fe^{+3}]$, en otras formulaciones (sulfato ferroso $(FeSO_4)$, sulfato férrico $Fe_2(SO_4)_3$).	Síntesis de clorofila, transferencia de energía, mantiene la estructura celular por lo que es importante en la calidad de la cosecha.
Manganeso	Mn	En forma iónica hidrosoluble $[Mn^{+2}]$ y sales como sulfato de manganeso $MnSO_4$	Síntesis de clorofila, asimilación de nitratos, síntesis de vitaminas y aminoácidos, asimilación del dióxido de carbono, germinación y madurez fisiológica de las semillas
Molibdeno	Mo	Forma elemental/ traza	Asimilación de nitrógeno y fosforo, favorece la interacción con bacterias benéficas
Níquel	Ni	Forma de catión divalente Ni^{2+}	Metabolismo del nitrógeno, formación de brotes foliares.
Zinc	Zn	Como óxido $[ZnO]$	Formación de clorofila y carbohidratos, tolerancia a sequía y bajas temperaturas, regulación de desarrollo, crecimiento longitudinal de brotes, tallos y frutos, formación de polen.

se conocen los mecanismos de los iones de cobre para evitar la germinación de esporas; no obstante, para lograr este efecto es necesario aplicar gran cantidad del producto. Sin embargo, cuando el cobre está en forma de NPs de cobre (Cu) y óxido de cobre (CuO), la dosis usada es menor y mucho más efectiva. De forma similar, las NPs de óxido de zinc (ZnO) tienen actividad antifúngica contra hongos fitopatógenos que causan la 'fusariosis', el 'tizón tardío' y la 'podredumbre' en varias hortalizas. Por lo tanto, el uso de estas NPs como nanofungicidas en la agricultura y en la industria alimentaria tienen gran potencial para incorporarlos a otras estrategias para el control de enfermedades de las plantas.

Por otro lado, se ha demostrado que en diferentes especies vegetales, los micronutrientes esenciales (Cu, Zn y Fe) en forma de NPs de sus óxidos, funcionan como nanofertilizantes, los cuales, aplicados a la raíz o al follaje, tienen efectos positivos sobre el crecimiento de las plantas [Fig. 3]. Por ejemplo, se ha estudiado el efecto de un tipo de NPs de CuO sobre algas acuáticas (*Elodea densa/canadensis*), en las cuales la fotosíntesis



puede ser estimulada (con menos de 0.25 mg/L), o inhibida (con más de 1 mg/L). El mismo efecto bifásico se observa cuando NPs de ZnO se aplican en cacahuete (*Arachis hypogaea*), donde 1000 ppm (ppm: partes por millón, equivalentes relativamente a unidades micro, $\mu\text{g/g}$ o $\mu\text{L/L}$) promueven la germinación de la semilla y el vigor de las plántulas, mientras que con 2000 ppm se muestra un efecto negativo y tóxico so-

bre el crecimiento y rendimiento del cultivo. Ya se mencionó que el fósforo es un elemento indispensable para el desarrollo de la planta; recientemente se encontró que las NPs de ZnO podrían actuar como cofactores (o moléculas auxiliares) de las enzimas que movilizan o solubilizan el fósforo, lo cual ayudaría a la absorción de compuestos con este elemento por las raíces de las plantas (ver *BiotecMov* No. 24, pp. 17-21).

Figura 3. Aplicación de Nanopartículas (NPs) de origen mineral en plantas. Las preparaciones de NPs se agregan en concentraciones de prueba a nivel foliar (hojas) o para absorción radicular (raíz+sustrato) y se evalúan parámetros de crecimiento, desarrollo y/o respuesta relativa ante infecciones con inóculos de hongos fitopatógenos conocidos, en comparación con los controles respectivos.

El cartel tiene un fondo azul oscuro con un perfil de una cabeza humana en amarillo y azul. A la izquierda, una gran letra 'E' blanca. En el centro, el texto 'Equidad de género' en blanco. Debajo, 'Comisión de equidad de género IBT'. En la parte inferior, el lema 'El logro de la equidad de género requiere la participación de todos' y la URL 'igualdaddegenero.unam.mx'. En la esquina superior derecha, el logo de CEG-IBT con símbolos de género.

Figura 4. Crecimiento del hongo causante de la “marchitez vascular” por *Fusarium oxysporum*, en ausencia (a) y presencia (b) de NPs de cobre. Se observa que en presencia de las NPs el crecimiento radial del hongo es inhibido.

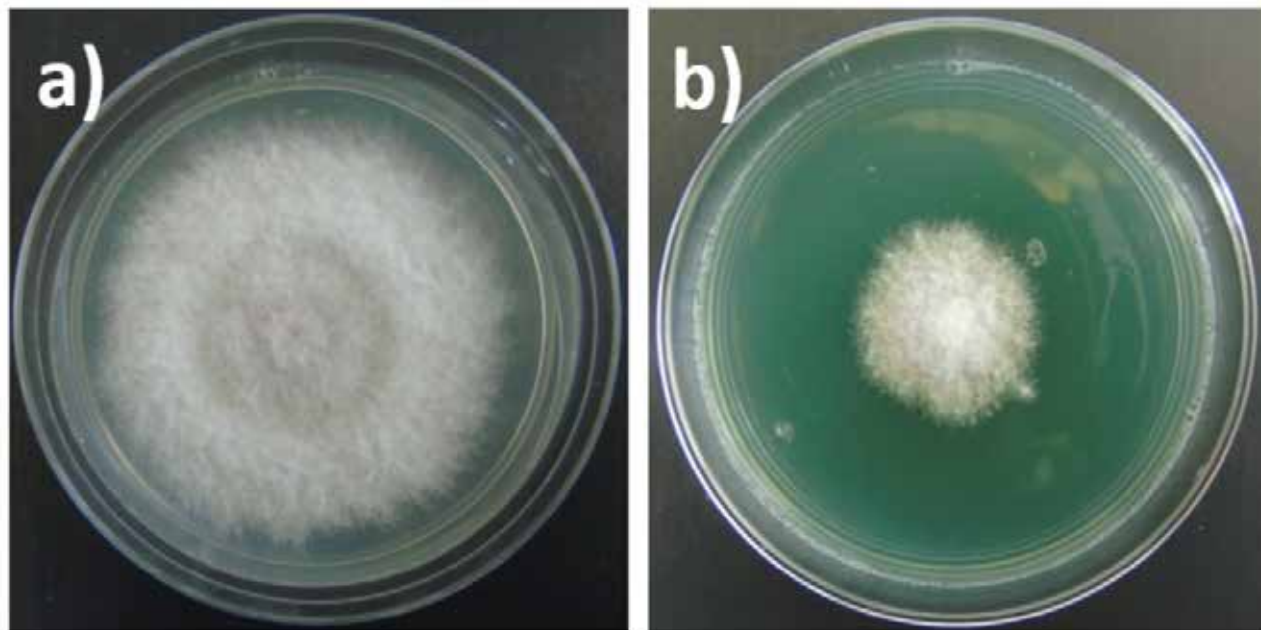


Figura 5. Crecimiento de plantas de tomate en: a) Ausencia de NPs de Cu y sin inoculación del hongo patógeno (*Fusarium oxysporum*), b) con aplicación de producto comercial, c) con aplicación de las NPs de Cu y d) sin aplicación de NPs pero con inoculación del hongo patógeno. Se observa que las plantas con aplicación de las NPs de Cu (c) no manifestaron síntomas de la enfermedad, mientras que los que no tuvieron tratamiento (d) tienen síntomas (hojas amarillas y secas) de la enfermedad de la “marchitez vascular”.

A pesar de haber cantidades considerables de hierro en el suelo, la deficiencia de Fe en plantas se presenta en muchos cultivos debido a la rápida conversión del hierro en formas no disponibles. La aplicación de fertilizantes de hierro inorgánico en suelos deficientes en Fe suele ser ineficaz. En cambio, el hierro liberado dinámicamente de las NPs de óxido de hierro (en forma de magnetita, maghemita, hematita, ferrihidrita, entre otras de sus formas minerales), pueden ser una fuente adecuada para las plantas. Existen experimentos donde las NPs de maghemita — una de las formas del óxido de hierro (III) Fe_2O_3 —, promovieron el crecimiento de cacahuate, donde se sugiere que podría haber interacciones con la regulación del contenido de fitohormonas y con la actividad de enzimas antioxidantes. Algo similar ocurre en trigo, cultivo en el que, usando NPs

de magnetita, además de favorecer el crecimiento, se aumentó la capacidad de prevenir el llamado ‘estrés oxidativo’.

Las NPs pueden ser aplicadas por aspersión, ya sea como nanofungicidas o nanofertilizantes, sobre el follaje o suministrados al suelo para que las raíces las absorban, aumentando la eficiencia en la distribución de micronutrientes, ya que se trata de un medio de liberación controlada [Fig.3].

Avances en nuestra tierra

Varios centros de investigación y universidades colaboramos en el estudio de NPs a base de hierro, cobre y zinc para desarrollar alternativas de control fitosanitario (vs. hongos patógenos) y fertilización efectiva. Hemos realizado y publicado varios artículos; uno de ellos se enfocó sobre el efecto de las NPs de magnetita en la germinación y crecimiento temprano

de encino (*Quercus macdougalii*) [2]. Este encino es una especie microendémica que se encuentra en los bosques secos montanos de Oaxaca y que está amenazado por la pérdida de su hábitat, además de tener bajos porcentajes de germinación en condiciones naturales. Demostramos que la aplicación de las NPs de magnetita incrementan el porcentaje de germinación de las bellotas de encino; también observamos un incremento en el crecimiento, en la biomasa seca y en la concentración de clorofila. Estos datos sugieren que las NPs de magnetita podrían usarse para mejorar potencialmente la conservación y reforestación de especies forestales amenazadas. Hicimos otro estudio realizado con NPs de ferrihidrita y hematita en el crecimiento de maíz [3]. Los resultados nos indican, primero, que estas NPs no son tóxicas para este cultivo; por



el contrario, las plantas tratadas incrementaron su crecimiento y contenido de clorofila y demostramos el transporte de las NPs de ferrihidrita y hematita, de la raíz a los tallos de maíz.

En otro proyecto, nuestro objetivo ha sido producir NPs de Cu con propiedades antimicrobianas, por sus propiedades antifúngicas contra diferentes hongos fitopatógenos [4]. A concentraciones de 0.25 mg/mL se inhibió el 65% del crecimiento de *Fusarium solani* y 70% de *Fusarium oxysporum* [Fig. 4]; ambos hongos causan la pudrición de raíces y la marchitez del follaje en diversas plantas como el jitomate. Encontramos concentraciones óptimas para inhibir el crecimiento de *Verticillium dahliae* (que ocasiona la 'verticilosis' con decoloración y enrollamiento de hojas) y de *Neofusicoccum* sp., (origen de la 'muerte regresiva' en ciertos árboles), con NPs de Cu. Más adelante, evaluamos el efecto antifúngico de estas NPs de Cu en experimentos a nivel de invernadero, contra la marchitez causada por *Fusarium oxysporum*

('fusariosis'), en plantas de jitomate [5]. Comparamos el efecto de un producto comercial de sales de hidróxido de cobre Cu(OH)₂ contra tres concentraciones de nuestro preparado. Los resultados mostraron que, desde la más baja concentración (0.5 mg/mL) de nanopartículas de Cu, sólo hubo una incidencia de la enfermedad del 30%, mientras que con una cantidad equivalente del producto comercial, cerca del 70% de plantas fueron afectadas [Fig. 5]. En general hemos obtenido evidencia de varios parámetros de crecimiento que nos indican que las NPs metálicas y sus óxidos, tienen capacidad potencial de prevenir enfermedades y contribuir a la nutrición vegetal. Sin embargo, aún es necesario afinar la medición de ciertos parámetros, determinar las concentraciones adecuadas para diferentes tipos de cultivos, así como identificar los mejores métodos de aplicación para su óptimo aprovechamiento, evitando en lo posible, su exposición innecesaria al ambiente.

Contacto: nicolaza.pariona@inecol.mx

Referencias

1. Allhoff F, P Lin & D Moore (2010). *What is nanotechnology and why does it matter?: from science to ethics*. Wiley-Blackwell.
2. Pariona N, Al Martínez, H Hernandez-Flores & R Clark-Tapia (2017). Effect of magnetite nanoparticles on the germination and early growth of *Quercus macdougalii*, *Sci Total Environ* **575**: 869–875. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.128.
3. Pariona N Al Martínez, HM Hdz-García, LA Cruz & A. Hernandez-Valdes (2017). Effects of hematite and ferrihydrite nanoparticles on germination and growth of maize seedlings, *Saudi J Biol Sci* **24**: 1547–1554, DOI: 10.1016/j.sjbs.2016.06.004.
4. Pariona N Al Mtz-Enriquez, D Sánchez-Rangel, G Carrión, F Paraguay-Delgado & G Rosas-Saito (2019). Green-synthesized copper nanoparticles as a potential antifungal against plant pathogens, *RSC Adv* **9**(33): 18835–18843. DOI: 10.1039/C9RA03110C.
5. Lopez-Lima D, Al Mtz-Enriquez, G Carrión, S Basurto-Cereceda & N Pariona (2021). The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: Effective treatment for *Fusarium* wilt and plant growth promoter, *Sci Hortic (Amsterdam)* **277**: 109810, 2021. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109810.

La M.C. Sofía Basurto C. y la Dra. Nicolaza Pariona M. están adscritas a la Red de Estudios Moleculares Avanzados del Instituto de Ecología, A.C., en Jalapa. Ver. El Dr. Daniel López Luna es académico de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Veracruzana y el Dr. Arturo I. Martínez Enríquez es investigador del CINVESTAV-IPN, Unidad Saltillo.

INSCRÍBETE AL

POSGRADO EN CIENCIAS BIOQUÍMICAS EN EL INSTITUTO DE BIOTECNOLOGÍA DE LA UNAM

OBJETIVO Formar maestros y doctores en ciencias con una alta calidad académica, que sean capaces de desarrollar proyectos de investigación básica y/o aplicada, así como realizar labores de docencia y difusión de la ciencia.

Consulte en la página del posgrado en Ciencias Bioquímicas los detalles y requisitos en la convocatoria para ingreso a posgrados de la UNAM <http://www.mdcbq.posgrado.unam.mx/index.php>



Instituto de Biotecnología



UNAM