

# El suelo y sus habitantes microbianos: consideraciones ecológicas

**Eduardo Valencia Cantero y  
Juan José Peña Cabriaes**

---

*El Dr. Juan José Peña Cabriaes es investigador titular del Departamento de Biotecnología y Bioquímica de la Unidad Irapuato del Cinvestav. Eduardo Valencia Cantero es estudiante de doctorado de este departamento.*

*Dirección electrónica: [jpeña@ira.cinvestav.mx](mailto:jpeña@ira.cinvestav.mx)*

## El problema de la diversidad

Hay quien piensa en el planeta Tierra como en un superorganismo (Gaia) y el suelo sería algo así como su piel. La piel de un organismo es un órgano complejo, y el suelo también lo es. El nombre “suelo” se derivó de la palabra latina *solum*, la cual significa piso o superficie. En Agronomía se define al suelo como la mezcla compleja de minerales, gases, líquidos, materia orgánica y organismos vivos que sustentan el crecimiento vegetal (figura 1). Los principales constituyentes minerales del suelo son arena, limo y arcilla (definidos según el tamaño de sus partículas, de mayor a menor dimensión). Entre más pequeñas sean las partículas minerales del suelo, tendrán una proporción área/volumen mayor y serán más reactivas porque es sobre la superficie donde se adsorbe el agua y los nutrientes y se llevan a cabo las reacciones químicas para la vida en el suelo. En un suelo fértil “ideal” aproximadamente el cincuenta por ciento del espacio es poroso: la mitad está ocupada por gases y la otra mitad por líquidos. Las interfaces sólido-líquido y líquido-gas son los sitios donde preferentemente viven los microorganismos (figura 2); se abre la posibilidad de formar gradientes de nutrientes, gases y pH en apenas volúmenes microscópicos, ya sea al interior de microporos colonizados o entre microporos contiguos; así se forman innumerables microambientes que ofrecen distintos nichos ecológicos. Pueden existir hongos que degraden materia orgánica, transporten nutrientes o infecten plantas, lo mismo que bacterias que mineralicen carbono respirando oxígeno o nitratos, muy cerca de aquellas que fermentan,

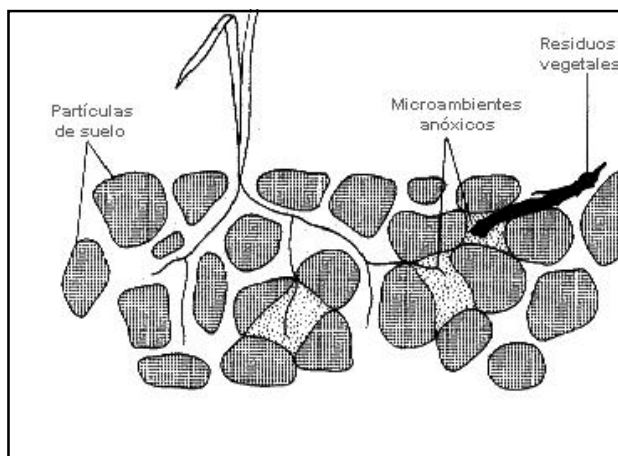


Figura 1. Componentes del suelo.

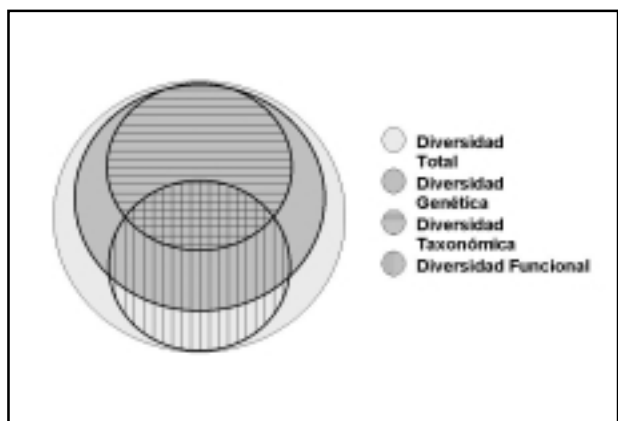


Figura 3. Principales componentes de la biodiversidad.

o de respiradoras de sulfato para las que el oxígeno es letal. Esto plantea el problema de la diversidad.

Definiremos diversidad biológica como el conjunto total de organismos y sus interacciones entre sí y con el medio<sup>1</sup> (figura 3). Estudiar la diversidad de microorganismos en el suelo es un reto formidable. Primero porque las definiciones clásicas de especie no se aplican a los microorganismos (muchos no tienen ciclo sexual) y tenemos que ajustarlas: aquí, especie es el conjunto de organismos que se parecen tanto entre sí como a sus progenitores. El aspecto morfológico en este caso no es muy útil para encontrar parecidos, ya que morfológicamente muchos microorganismos distintos se parecen demasiado entre sí. De esta forma tenemos que echar mano de las características fisiológicas para definir especies; otro obstáculo a salvar es el hecho de que un mismo micro-

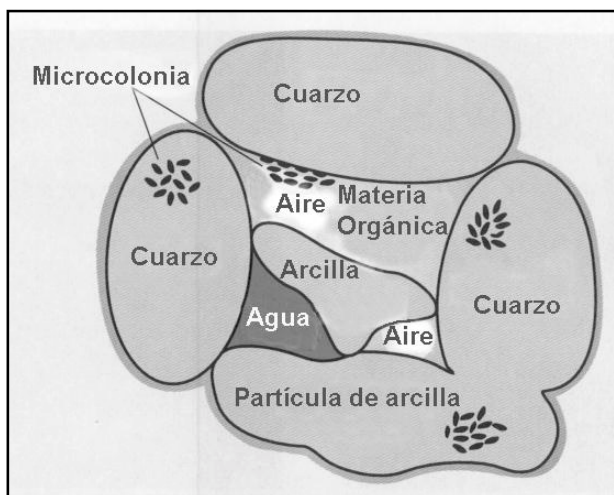


Figura 2. Interfaces sólido-líquido y líquido-gas.

organismo puede comportarse de maneras muy distintas ante cambios del ambiente. La necesidad de mantener condiciones controladas hace que los microorganismos deban ser aislados y estudiados en el laboratorio; sin embargo, se estima que sólo un 0.3% a 10% de las bacterias del suelo han sido cultivadas. Una vez que han sido considerados estos aspectos, se determinan las especies presentes y se calcula la diversidad taxonómica.

## Biodiversidad en el Bajío

Las dificultades metodológicas hacen que el estudio de la diversidad del suelo esté muy rezagada respecto del estudio de otros ambientes. La diversidad genética es el conjunto total de genes presentes en los microorganismos de un lugar determinado y expresan un potencial de las capacidades metabólicas de ese ambiente; la diversidad genética puede estimarse según el número de genomas distintos en un ambiente y es aún más amplia que la taxonómica, ya que el flujo de genes entre microorganismos de distintas especies es una realidad. No obstante, es más difícil de obtener y de organizar al profundizarse en el nivel de detalle. Una medición de la diversidad más operativa es la diversidad funcional, definida como el conjunto de capacidades metabólicas presentes en el suelo; es una información más gruesa que no repara en taxas y que no requiere grandes conocimientos acerca de los microorganismos, pero expresa las capacidades metabólicas de los microorganismos del suelo.

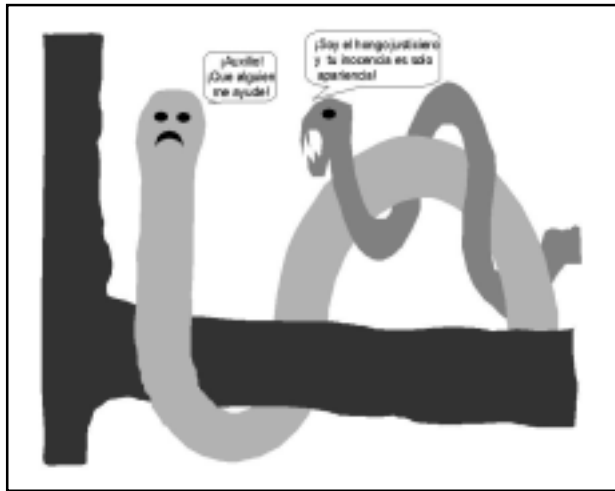


Figura 4. Biocontrol con el hongo *Trichoderma* spp.

Las tres mediciones de diversidad de que hemos hablado en su conjunto, y puestas en relación al ambiente, expresan la diversidad total. ¿Cuál de ellas es la más representativa?, ¿se pueden inferir a partir de una de ellas a las demás?, ¿qué tanta diversidad se está perdiendo en los suelos por el manejo agrícola? Estas interrogantes orientan una de las líneas actuales de investigación del laboratorio de Microbiología Ambiental de la Unidad Irapuato del Cinvestav, en la que se conjuntan técnicas de microbiología clásica y técnicas de biología molecular.

Nuestra área de estudio, el Bajío de Guanajuato, comprende una extensión de quinientos mil hectáreas de cultivo, en las que desde hace más de treinta años se ha mantenido una producción agrícola intensiva con base en una gran cantidad de insumos como son plaguicidas y fertilizantes nitrogenados, con una rotación cereal-cereal, cereal-hortaliza y cereal-leguminosa<sup>2</sup>. La repercusión de estas prácticas en la diversidad de microorganismos aún no se conoce.

El estudio de la ecología del suelo comprende también las relaciones de los microorganismos entre sí y con las plantas, las cuales pueden ser benéficas, deletéreas o neutras. Un caso muy ilustrativo se da también en el Bajío y es el de la relación del cultivo del ajo (*Allium sativum*) con el hongo fitopatógeno *Sclerotium cepivorum* y el hongo depredador de hongos *Trichoderma* spp. *S. cepivorum* es el causante de la pudrición blanca del ajo,

enfermedad que frecuentemente causa la pérdida total de las cosechas. La alternativa de control químico implica el uso del biocida bromuro de metilo que se aplica en altas dosis al suelo y que se volatiliza en la atmósfera. Sin embargo, la elevada toxicidad del bromuro de metilo y el grave efecto que tiene sobre la capa de ozono hacen que tenga sus días contados. Una alternativa de biocontrol se presenta a través de manejo del hongo *Trichoderma* spp. (figura 4).

El volumen circundante a la raíz de una planta (rizósfera) es un espacio muy competido; en condiciones normales las raíces secretan al suelo compuestos energéticos que estimulan el crecimiento de una flora de hongos y bacterias frecuentemente benéficos. Muchos de los intentos de introducción de microorganismos forasteros al suelo fracasan por la incapacidad del microorganismo introducido de vencer la competencia por espacios y nutrimentos de los microorganismos locales mejor adaptados, de manera que los introducidos más temprano que tarde son eliminados. Una salida a esta disyuntiva es la selección de microorganismos locales con las características deseadas. A través de un trabajo en colaboración con el Laboratorio de Expresión Genética de Hongos se han seleccionado cepas de *Trichoderma* originarios del Bajío, con grandes dotes como depredadores de *S. cepivorum*<sup>3</sup> y en base a su huella genética se ha estudiado su capacidad de colonización en la rizósfera de ajo en condiciones naturales. Los resultados son muy estimulantes. De esta manera se prepara el estudio en condiciones controladas de laboratorio de la colonización de *Trichoderma* locales que han sido genéticamente transformados para aumentar su aptitud como depredadores de *Sclerotium*, y que aguardarán dentro de nuestros refrigeradores a que sea autorizada su liberación.

## Reciclaje de nutrimentos

En el suelo, los microorganismos alcanzan densidades poblacionales muy altas, entre los  $10^7$  y  $10^9$  organismos por gramo del suelo. Eso les da una repercusión ambiental muy considerable. El reciclaje de nutrimentos en la biósfera es realizada por los microorganismos (figura 5) y constituyen la punta de la cúspide de la pirámide alimenticia, o simplemente son tributarios de los flujos de materia y energía del ecosistema global. Uno de los ciclos biogeoquímicos más estudiados es el del nitrógeno, debido

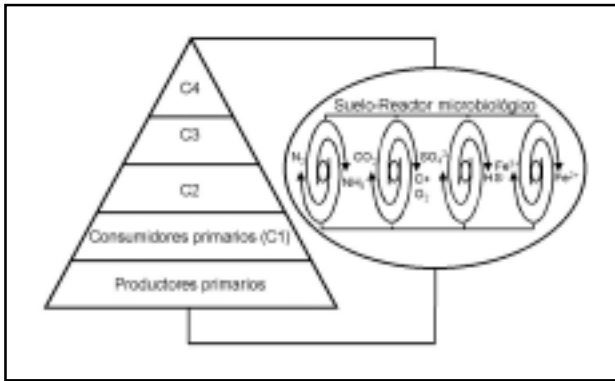


Figura 5. Reciclaje de nutrientes por microorganismos.

a su importancia en la producción agrícola, y en últimas fechas por su importancia ambiental.

Por ejemplo, en el Bajío guanajuatense en 1997 se aplicaron ciento cincuenta mil toneladas de nitrógeno como fertilizantes<sup>4</sup> (aproximadamente el 15% de los fertilizantes empleados en el país), y cada año se requiere aumentar la dosis de fertilizantes sólo para mantener la producción. El empleo de la técnica de enriquecimiento isotópico de <sup>15</sup>N (isótopo estable de abundancia natural conocida)<sup>5</sup> ha mostrado que sólo un cincuenta por ciento o menos del nitrógeno que se adiciona al sistema es recuperado en las plantas, o permanece en el suelo. El nitrógeno restante se pierde, ¿dónde queda ese nitrógeno? (figura 6).

En el Bajío, las prácticas agrícolas intensivas no incluyen el uso de los abonos verdes y se prefiere la quema de los residuos agrícolas a su incorporación en el suelo; lo cual ha ocasionado una drástica disminución de la materia orgánica en él. La materia orgánica en el suelo además de estimular la formación de canales, poros, y diversas poblaciones bacterianas, realiza una función de almacenamiento de nutrientes, de manera que su pérdida va en detrimento de la capacidad del suelo para sustentar la vida vegetal; podría decirse que en casos graves el suelo sólo está actuando como sitio de anclaje de las raíces vegetales, y que los nutrientes se tienen que adicionar, a semejanza de lo que se hace en un sistema de hidroponía. El uso del <sup>15</sup>N nos revela que aproximadamente un veinte por ciento del nitrógeno se pierde arrastrado por el agua hacia el subsuelo (lixiviación) y que otro tanto se pierde por conversión a gases<sup>4</sup> por

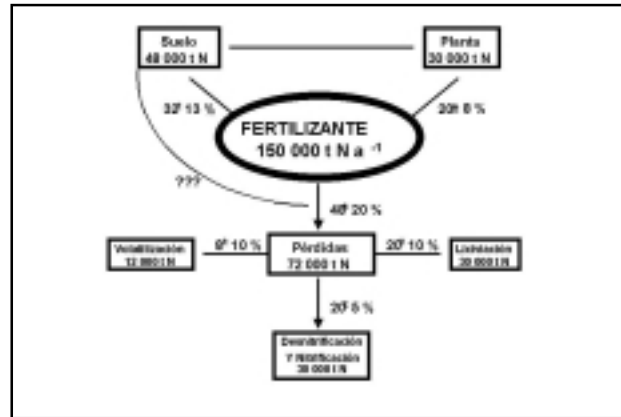


Figura 6. Pérdidas de nitrógeno en el Bajío Guanajuatense.

efecto de dos procesos bacterianos: desnitrificación (respiración bacteriana de nitratos) y nitrificación (“quema” bacteriana de nitrógeno de alta energía). Estos últimos dos procesos emiten a la atmósfera tanto  $N_2$  como gases del efecto invernadero ( $NO$  y  $N_2O$ ) que también tienen poder de destrucción sobre la capa de ozono. Hechos como éstos nos hacen buscar alternativas para mejorar en términos integrales la práctica de la fertilización, y así agregar el nitrógeno en forma química, en el momento y en las cantidades indicadas para incrementar su aprovechamiento por los cultivos y disminuir de manera muy considerable pérdidas tanto económicas como desde el punto de vista ambiental.

El proceso contrario a la pérdida de nitrógeno por efecto bacteriano es la fijación de nitrógeno. El nitrógeno es por mucho el gas más abundante en el aire (setenta y ocho por ciento), pero ésta es una forma química casi inerte y no asimilable para la inmensa mayoría de los seres vivos. La carencia de nitrógeno en microorganismos y plantas es algo así como morir de sed en un mar de agua... salada. Hasta la fecha todos los organismos que se sabe que tienen la capacidad de fijar nitrógeno son procariotes, células individuales sin núcleo, o sea bacterias y arqueas pero no hongos. Algunos de estos microorganismos fijan nitrógeno por su cuenta, pero los hay también que sólo lo hacen en asociación con plantas (casi siempre de la familia leguminosa), tal es el caso de las bacterias *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* y *Azorhizobium*, que se introducen en el tejido de la raíz de las plantas formando una estructura semejante a un tumor que colonizan y en donde, a cambio de rico y energético carbono que toman de la planta, le retribuyen compuestos



de nitrógeno para su disfrute privado. A esto sí se le llama simbiosis. ¿Cuánto nitrógeno puede entrar así al Bajío?, mucho. En el caso de cultivos como el haba (*Vicia faba*) 500 kg /hectárea/ año, alfalfa (*Medicago sativa*) 260 kg/ hectárea/ año o el frijol (*Phaseolus vulgaris*) 70 kg/hectárea/ año. Con todo, en ocasiones este nitrógeno no alcanza para reponer todo el nitrógeno que se saca del sistema vía cosecha, pero por supuesto es mucho mejor que si no estuviera. Para mejorar la fijación de este elemento en cultivos de interés se ha buscado asociar a estos cultivos con la bacteria correcta; ¿Cuál es la bacteria correcta?, mucho tiempo se pensó que aquella que tuviera una mayor capacidad para fijar nitrógeno, pero pocas veces la mejor fijadora de nitrógeno es la más apta para competir con las bacterias locales de la rizósfera por un espacio que le permita colonizar a la planta<sup>6</sup>. Pocas veces, por tanto, las bacterias introducidas en los cultivos se reflejan en la tasa de fijación de nitrógeno de manera significativa.

Es muy conocido que una bacteria fijadora de nitrógeno no puede colonizar a una planta si ésta no lo consiente, es decir la planta lleva el control de la simbiosis. La planta responde o no a señales bioquímicas, y en base a esto puede seleccionar qué bacterias la nodularán.

Es de llamar la atención que la nodulación de plantas con cepas pobremente fijadoras de nitrógeno haya permanecido a través de los múltiples eventos de la selección natural que condena a la extinción a los sistemas menos eficientes. Una explicación muy razonable es que los linajes bacterianos pobres en fijación de nitrógeno estén realizando otro “servicio” a la planta que las hospeda. En el caso del frijol, una pista fue que la mayor parte del frijol en México (su centro de origen) se siembra en terrenos de temporal con escasez de agua<sup>7</sup>.

Nosotros hemos observado que algunas bacterias que son deficientes fijadoras de nitrógeno cuando la sequía empieza a afectar a la planta sintetizan un azúcar llamado trehalosa<sup>8</sup>. Este azúcar permite a las llamadas plantas de la resurrección de ambientes desérticos volver de situaciones de desecación extrema, y es empleado en la industria alimenticia para aumentar la vida de anaquel de frutas y verduras, o en investigaciones bioquímicas para estabilizar membranas. Es tal la diversidad de bacterias potencialmente noduladoras de frijol en las zonas semiáridas de México que probablemente sea mejor tratar de encontrar sus ventajas competitivas que intentar sustituirlas por bacterias extrañas a estos suelos.



Desconocemos mucho sobre la diversidad biológica de los microorganismos y su potencial para resolver problemas biotecnológicos, ya sea control biológico, fertilidad del suelo o resistencia a sequía; sin embargo, sí conocemos que la tendencia actual en la biósfera es a la pérdida de la biodiversidad. Por tanto, la exploración de los potenciales genéticos de los microorganismos también es una tarea a atender. En Guanajuato, por ejemplo, existe una serie de manantiales termales con una flora microbiológica no plenamente investigada; en fechas recientes estos organismos han sido útiles en nuestro laboratorio para la investigación de fenómenos disímolos como la corrosión bacteriana de metales<sup>9</sup> y la biorremediación, pero definitivamente no podemos dejar que tan preciosos organismos se vayan sin haberlos conocido.



## Notas

1. J.C. Zak *et al.*, *Soil Biol. Biochem.* **26**, 1101 (1994).
2. O.A. Grageda-Cabrera *et al.*, *J. Sustainable Agriculture* **16**, 75 (2000).
3. A. Flores, I. Chet y A. Herrera-Estrella, *Curr. Genet. Jan* **31**, 30 (1997).
4. O.A. Grageda-Cabrera, F. Esparza-García y J.J. Peña-Cabriales, *Environmental biotechnology and cleaner process*, E. Olguín, G. Sánchez y E. Hernández, Eds. (Taylor & Francis, EUA, 2000) p. 45.
5. G. Hardarson, y S.K.A. Danso, *Aumento de la fijación biológica del nitrógeno en el frijol común en América Latina*, J.J. Peña y F. Zapata, Eds. *Arcal.* **19** (1999).
6. J. Vázquez-Arroyo *et al.*, *Plant and Soil* **204**, 147 (1998).
7. J.J. Jiménez, J.J. Zacarías y J.J. Peña Cabriales, *Arcal.* **1** (1999).
8. R. Farías-Rodríguez *et al.*, *Physiol. Plant.* **102**, 335 (1998).
9. E. Valencia-Cantero, Martínez-Romero y J.J. Peña-Cabriales, Memorias del XXXII Congreso Nacional de Microbiología, **43** (Sup 1), 316 (2001).