

La microbiota de las raíces de los árboles

¡Construyamos una casa en el árbol! Pero, ¿qué sostiene al árbol?



Ana V. Lasa

Microbiología de Ecosistemas Agroforestales, Departamento de Microbiología del Suelo y la Planta, Estación Experimental del Zaidín, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Granada, España.

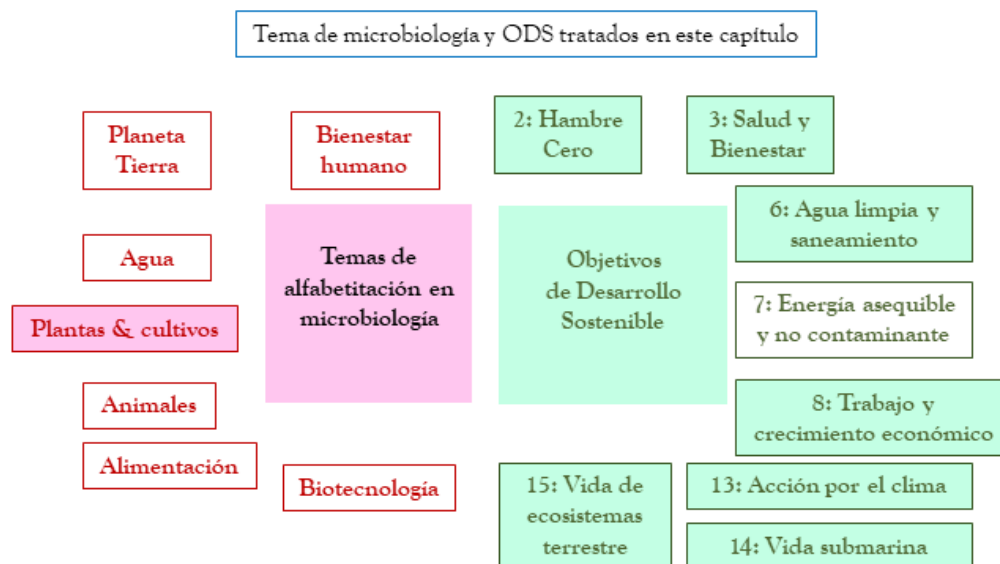
La microbiota de las raíces de los árboles

Argumento

El imposible saber exactamente cuántos árboles hay en el planeta, aunque se ha estimado que podría haber sobre unos tres trillones. Aunque puede parecer mucho, realmente no lo es, puesto que antes de la civilización humana la Tierra albergaba aproximadamente seis trillones de árboles. Además, estamos perdiendo en torno a 15 billones de árboles anualmente para satisfacer ciertas necesidades humanas, como la obtención de papel y madera, la producción de alimentos o debido a la expansión de las zonas cultivables, entre otros. La pérdida de tantos árboles tiene un impacto negativo significativo sobre el planeta y sobre el bienestar humano, puesto que los árboles¹ proporcionan una gran cantidad de servicios de alto valor: son una gran fuente de productos (madera, leña, fibra, alimentos humanos y animales como frutos secos, e incluso medicinas), y proporcionan también beneficios no comerciales como la producción de oxígeno, protección del suelo, regulación hidrológica, fijación de carbono atmosférico, además de mejorar los espacios recreativos.

Todos estos beneficios (también conocidos como “servicios ecosistémicos”) que nos proporcionan los árboles son muy dependientes de uno de sus órganos: el sistema radicular y sus microorganismos asociados. Sin los microorganismos, las raíces no podrían cumplir con sus funciones, los árboles no podrían sobrevivir y, por tanto, tampoco lo podríamos lograr nosotros.

La microbiología y el contexto social



La microbiología: microbioma vegetal; interacciones planta-microorganismo; sistema radicular; rizosfera; biotecnología de microorganismos de plantas; silvicultura. *Cuestiones de*

¹ Existen diferentes tipos de árboles: aquellos que forman parte de bosques templados, tropicales y boreales (pinos, robles, etc.), árboles de cultivo como olivos o frutales, y árboles ornamentales, los cuales pueden encontrarse en las ciudades o parques (árboles urbanos).

sostenibilidad: cultivo vegetal, seguridad y calidad alimentaria; mejor uso de zonas cultivables; prácticas forestales sostenibles; salud; provisión de alimentos; economía; empleabilidad; cambio climático.

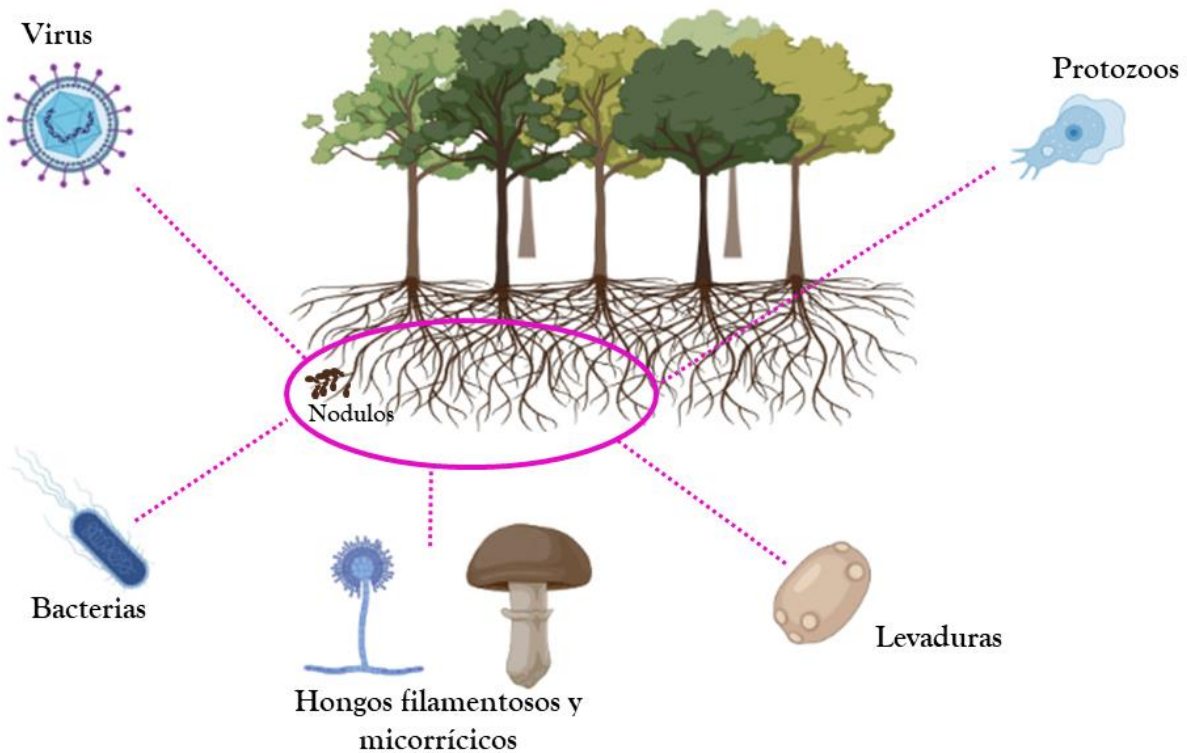
La microbiota de las raíces de los árboles: la microbiología

1. El sistema radicular respalda la planta completa. El sistema radicular es considerado como un órgano vegetal, pues es distinto física y funcionalmente al resto de partes de la planta, y desempeña funciones esenciales. Actúa como una *aspiradora*: absorbe el agua y los nutrientes directamente desde el suelo y los transporta a través del tallo para que sean distribuidos a otros órganos vegetales: las hojas, las flores, los frutos, etc. Algunos de los nutrientes que absorben son almacenados directamente en las raíces durante los meses más fríos del año, por lo que las raíces pueden considerarse como *almacenes de alimento*.

Además, las raíces ayudan a mantener en pie a los árboles ya que los anclan al suelo: así se reduce la probabilidad de que resulten arrancados cuando tienen lugar fenómenos medioambientales extremos, como fuertes vientos, inundaciones, nevadas, etc. Para que te hagas una idea, piensa en el excelente soporte que suponen las raíces de una secuoya gigante: sin un sistema radicular bien desarrollado, el peso del tronco de una secuoya que alcance más de 10 m no podría ser mantenido.

2. Las raíces y el suelo adherido a las mismas: ¿quién se encuentra allí? No solamente las raíces son importantes, sino también el suelo fuertemente adherido a ellas, el cual se conoce como rizosfera. Aunque *a priori* pueda parecer que la rizosfera es un ambiente hostil y sin vida, esta alberga una enorme diversidad de microorganismos (microbioma o microbiota): de hecho, la rizosfera es uno de los ambientes de la superficie terrestre que acoge al mayor número de microorganismos diferentes. Entre ellos podemos encontrar muchos tipos diferentes de bacterias, por ejemplo, algunas que establecen relaciones simbióticas con los árboles (ambos organismos, la planta y los microbios, dependen entre sí y obtienen beneficios mutuamente) y forman nódulos o bultos dentro de los cuales viven algunos microorganismos que le proporcionan compuestos beneficiosos al árbol hospedador (Caja 1).

Caja 1. Microorganismos que habitan en la rizosfera de los árboles



Otros organismos simbióticos son los hongos micorrícicos, los cuales penetran o viven sobre la superficie de las raíces y forman un manto o red compuesto por las raíces y los propios hongos que se puede extender a lo largo de una gran superficie de suelo, incrementando así el área de absorción de nutrientes. Seguramente hayas visto una seta cerca de algún árbol en el bosque: se trata probablemente de un hongo micorrícico.



El hongo *Amanita muscaria* creciendo en un pinar, estableciendo relaciones simbióticas con los pinos. Fotografía: Ana V. Lasa

Las levaduras (hongos unicelulares) también habitan en el suelo rizosférico, al igual que los nematodos, gusanos microscópicos que también pueden tener efectos beneficiosos sobre los árboles. Sin embargo, algunos de ellos son enemigos de estos. Los virus que habitan en el suelo

tampoco deben ser ignorados: son unos de los organismos más abundantes en la Tierra y son depredadores de otros microorganismos que viven en el mismo ambiente, por ejemplo, las bacterias

3. *La microbiota de la rizosfera: ¿qué hacen los microorganismos allí?*

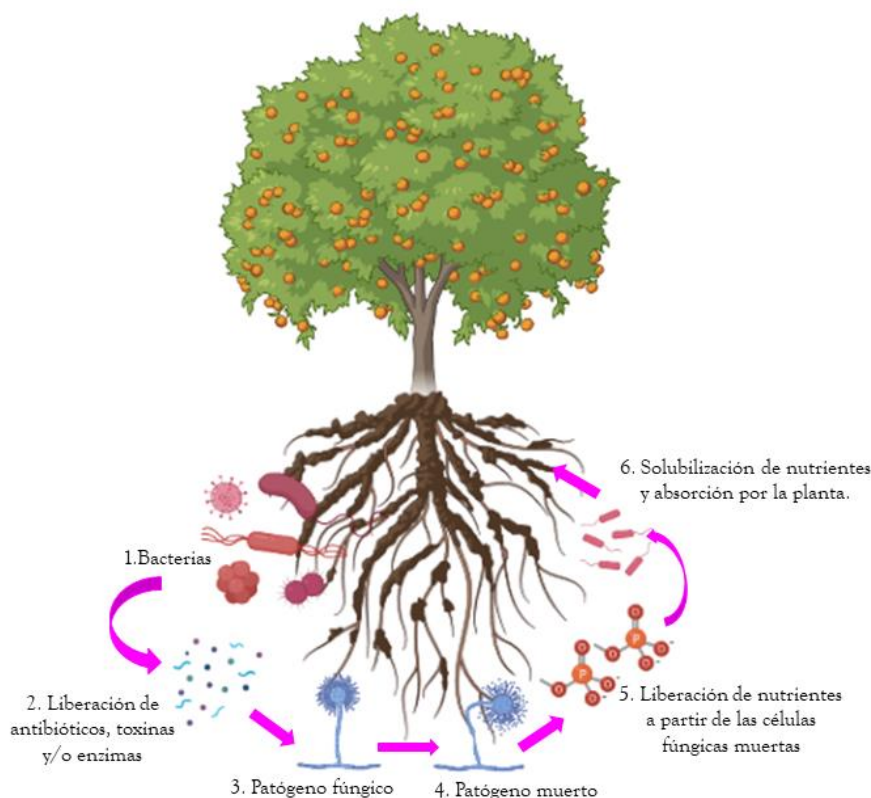
- a. Algunos microorganismos pueden causar enfermedades de gran importancia a los árboles. Estos pueden enfermar, como hacemos los animales y humanos. En muchos casos, la puerta de entrada de los patógenos es el sistema radicular. La microbiota de las raíces está constituida en su mayoría por microorganismos beneficiosos, aunque las raíces también pueden albergar algunos patógenos, como bacterias, hongos, virus, nematodos, etc.

Cuando los árboles enferman, en ocasiones desarrollan síntomas visibles en las raíces o en otras partes. Por ejemplo, este es el caso de la podredumbre de las raíces ocasionada por diferentes hongos, una enfermedad que se caracteriza por el escaso crecimiento de los árboles, hojas marchitas y ramas débiles.

En muchas enfermedades de las raíces, estas no pueden hacer bien su trabajo, por lo que los árboles se debilitan e incluso pueden morir. Este tipo de enfermedades no deben ignorarse puesto que pueden transmitirse de un árbol infectado a otro y diseminarse a lo largo de todo el bosque o de la zona de cultivo, como una finca de manzanos o de melocotoneros.

- b. Los microorganismos también pueden prevenir las enfermedades de los árboles. La rizosfera alberga, además, microorganismos que son capaces de prevenir las infecciones microbianas. Algunas bacterias han desarrollado la capacidad de producir compuestos que reducen el crecimiento de los patógenos, como antibióticos (similares a los que tomamos cuando estamos enfermos), toxinas que atacan directamente a los patógenos, o enzimas (proteínas que llevan a cabo funciones esenciales en las células) que *disuelven* la pared celular o “piel” de las células de los patógenos y, por consiguiente, estos mueren (Caja 2). Además, los microorganismos pueden estimular el sistema inmune de las plantas, preparándolas para hacer frente a ataques de futuros patógenos. Por lo tanto, los microorganismos pueden ser aplicados a las raíces para prevenir las enfermedades infecciosas.

Caja 2. Ejemplo de un fenómeno de antibiosis y ciclado de nutrientes en la rizosfera



- c. La supervivencia de los árboles depende de la microbiota de la rizosfera. Además de la prevención de enfermedades, los microorganismos que habitan en la rizosfera desempeñan otros papeles relevantes para la salud de su hospedador. Pueden *disolver* los nutrientes que están en el suelo de una forma no disponible para las plantas, mejorando, por tanto, la nutrición vegetal. Algunos microorganismos producen hormonas vegetales llamadas fitohormonas que son esenciales para el crecimiento de los árboles y para que tengan lugar ciertos procesos como la floración o la producción de frutos. Los microorganismos también contribuyen a la supervivencia de los árboles ya que son capaces de mejorar la tolerancia de sus hospedadores a diferentes estreses de tipo ambiental, como el causado por las altas temperaturas o por las bajas precipitaciones. Todas estas propiedades hacen de los microorganismos excelentes candidatos para ser aplicados como si estos fueran fertilizantes (biofertilizantes).
- d. La estructura de las raíces y la calidad del suelo que las rodea depende su microbiota asociada. Debido a la actividad microbiana (especialmente, a la actividad de los hongos micorrícicos), las raíces pueden variar su morfología. Cuando estas establecen relaciones simbióticas con los hongos micorrícicos, aumenta la superficie del suelo cubierta por las raíces. Otros microorganismos pueden descomponer la hojarasca y la madera muerta, lo cual supone una adición al suelo de más nutrientes, agua y oxígeno, mejorando por tanto la calidad del mismo.

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los grandes retos

La utilización de productos obtenidos de los árboles, de biofertilizantes microbianos y la importancia del sistema radicular de los árboles se relaciona con diferentes ODS, entre los que se incluyen:

- **Objetivo 2: Hambre cero, alcanzar la seguridad alimentaria y una mejor alimentación y promover la agricultura sostenible.** Los árboles sanos que producen alimentos, como manzanas, cerezas, olivas, frutos secos, resultan en una mayor cosecha y de mejor calidad que aquellos que no están sanos, o que aquellos que sufren una infección por un patógeno. Además, la seguridad alimentaria es mayor en aquel caso. Por otro lado, un buen equilibrio de nutrientes en la rizosfera (alcanzado, generalmente, por un microbioma sano) es sinónimo de frutos de mayor valor nutricional.
- **Objetivo 3: Asegurar la salud y el bienestar en todas las edades:** los bosques contribuyen a la salud humana y nos proporcionan bienestar de diferentes maneras, por ejemplo, generando una atmósfera rica en oxígeno o siendo el lugar al que ir a dar un paseo. Mantienen una microbiota rizosférica sana, y, por lo tanto, bosques sanos, nuestra salud física y mental puede mejorar debido a las actividades que en los bosques podemos realizar, lo cual, a su vez, puede suponer grandes ahorros en los presupuestos sanitarios y una mejora de nuestra calidad de vida.
- **Objetivo 6: Asegurar la disponibilidad y un manejo sostenible de agua y saneamiento para todos.** Si se aplican microorganismos de la rizosfera a los árboles de cultivo en vez de grandes cantidades de fertilizantes químicos o pesticidas, el agua de riego recibiría menor cantidad de contaminantes, y tendríamos una menor contaminación del agua de escorrentía. Por otro lado, la producción a gran escala de microorganismos como fertilizantes es un proceso que supone un gran consumo de agua, por lo que este objetivo sería más difícil de alcanzar.
- **Objetivo 8: Promover un crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo productivo y decente para todos.** El uso de fertilizantes basados en microorganismos beneficiosos (biofertilizantes) podría apoyar el crecimiento económico de diferentes maneras. En primer lugar, el desarrollo de biofertilizantes implica diferentes tipos de negocios o actividades (investigación, desarrollo del producto, marketing, transporte, ventas, etc.), mientras que la aplicación de los biofertilizantes puede apoyar la creación de trabajos relacionados con la agricultura, la silvicultura o la industria de los árboles ornamentales. Es importante subrayar que las tierras de cultivo o forestales que han sido previamente abandonadas debido a las enfermedades de los árboles o a la baja productividad, podrían regenerarse, creando nuevas oportunidades de empleo.
- **Objetivo 13: Acción por el clima.** Los árboles, como principales actores en la actividad fotosintética mundial, desempeñan un rol muy importante en la captura y *secuestro* de carbono, por lo tanto, son elementos esenciales frente al calentamiento global y el cambio climático. El uso de biofertilizantes o microorganismos para prevenir las enfermedades de los árboles reduciría el uso de fertilizantes químicos, pesticidas, etc., lo cual contribuiría a mitigar la emisión de gases de efecto invernadero que tiene lugar durante la producción de dichos compuestos, y la liberación de compuestos contaminantes y perjudiciales al ambiente. Además, un

sistema radicular sano tiene impacto positivo en la parte aérea de los árboles (hojas, tronco), lo cual supone una mayor actividad fotosintética y por lo tanto, una mayor fijación de CO₂ y emisión de O₂ a la atmósfera.

- **Objetivo 15: Proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestión forestal sostenible, combatir la desertificación, detener y revertir la degradación del suelo y detener la pérdida de biodiversidad.** La explotación de los bosques y sus productos (madera, resina, frutos, etc.) supone un reto para la consecución de este ODS. Si un árbol que sufre una infección microbiana no es diagnosticado adecuadamente y se utiliza en tareas silvícolas, la infección puede ser transmitida a otros árboles (por ejemplo, si se emplea material de trabajo contaminado como sierras, etc.), lo cual puede desencadenar importantes pérdidas ambientales y económicas. Por el contrario, la utilización de fertilizantes basados en microorganismos o en sus productos puede ayudar a obtener bosques sanos y combatir la desertificación. Puesto que los bosques actúan como refugio de muchas otras especies vegetales, animales y microbianas, su conservación y mejora de su estado de salud tiene un fuerte impacto positivo en el mantenimiento de la biodiversidad global.

Participación de los alumnos

1. *Discusión en clase sobre la importancia global de los árboles y sus órganos (especialmente, las raíces). Discusión sobre la relevancia de las interacciones árbol-microorganismo.*
2. *Sensibilización de los alumnos*
 - a. ¿Por qué debemos preocuparnos por el estado de salud de la rizosfera?
 - b. Manteniendo una rizosfera sana de los árboles, ¿qué ODS crees que no se puede alcanzar?
 - c. ¿Existe alguna acción que tú podrías llevar a cabo para asegurar una rizosfera sana o proteger los bosques?
 - d. En relación al uso de biofertilizantes microbianos para mejorar la salud de los árboles:
 - i. ¿De qué ecosistema(s) crees que deberían aislarse los microorganismos para ser inoculados?
 - ii. ¿Crees que podemos encontrar patógenos humanos en la rizosfera de especies forestales? ¿Y en la rizosfera de árboles de cultivo que han sido tratados con estiércol vacuno o de ovejas?
3. *Ejercicios*
 - a. Piensa en tu árbol favorito (especie forestal, ornamental o de cultivo, por ejemplo, los pinos), y
 - i. Investiga sobre su área de distribución en todo el mundo. ¿En qué zonas principales se puede encontrar esta especie?
 - ii. ¿Cuáles podrían ser las consecuencias de perder esta especie (por una infección, una tala masiva, etc.)? Puedes empezar desde una perspectiva local (por ejemplo, el huerto de tu abuela) y avanzar

hasta la escala global (todas las fincas existentes de dicha especie en el mundo).

- iii. ¿Se vería en tal caso la alimentación humana afectada?
- iv. ¿Tendrían los animales como las abejas o las cabras alimento suficiente?
- v. ¿Se vería el bienestar humano negativamente afectado? Considera todos los productos que puedes usar o consumir a partir de dicha especie: madera para construir casas, granos de cacao necesarios para obtener chocolate, etc.

Base empírica, lecturas complementarias y recursos didáctico

Protección de la biodiversidad del suelo:

<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2022.677917>

El microbioma de la rizosfera:

Mendes, R., Garbeva, P. & Raaijmakers, J.M. 2013. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. FEMS Microbiol Rev 37: 634-663. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>

Mercado-Blanco, J., Abrantes, I., Barra Caracciolo A., Bevivino, A., Ciancio, A., Grenni, P., Hryniewicz, K., Kredics, L., & Proença, D. 2018. Belowground Microbiota and the Health of Tree crops. Front Microbiol 9: 1006. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01006>

Los hongos del suelo:

<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2022.652660>

Glosario

Enzima: proteínas que actúan de forma similar a *máquinas*, puesto que son capaces de ejecutar diferentes tipos de reacciones que ocurren en el interior (e incluso exterior) de las células. Ayudan a acelerar las reacciones químicas. Existen diferentes tipos de enzimas en función de su estructura o función, y se pueden encontrar en todos los organismos vivos. Por ejemplo, existen enzimas en tu tracto digestivo que ayudan a que la carne que ingieres se transforme en pequeñas *piezas* de tal forma que los nutrientes contenidos en la carne puedan ser absorbidos.

Fitohormona: hormona vegetal. Moléculas orgánicas producidas por las plantas y algunos microorganismos que están implicadas en procesos esenciales vegetales, como el desarrollo de las raíces, la elongación del tallo, la floración, la producción de fruto, etc.

Hongos micorrícicos: hongos que establecen relaciones mutualistas con las raíces de las plantas. No pueden sobrevivir sin interactuar con la planta hospedadora porque no son capaces de adquirir nutrientes ni energía del ambiente, por lo que la planta se lo suministra y al mismo tiempo ellos le proporcionan a las plantas hospedadoras otros nutrientes. Prácticamente el 80% de todas las especies vegetales interactúan con hongos micorrícicos. Existen dos tipos de estos hongos: endomicorrícicos o arbusculares (aquellos

que penetran en el interior de las células de la raíz) y ectomicorrícicos (no penetran la pared celular vegetal).

Levaduras: hongos unicelulares que habitan en diferentes ecosistemas, como suelos, el cuerpo humano, ecosistemas acuáticos, entre otros. Se utilizan comúnmente en diferentes industrias para obtener productos fermentados como pan, cerveza, vino y otras bebidas alcohólicas, biocombustibles, e incluso medicinas. Existen algunas especies que causan enfermedades en humanos, animales y plantas.

Microbiota o microbioma: conjunto de microorganismos que viven en un ecosistema concreto. Puede estar compuesto de bacterias, hongos, levaduras, virus, protozoos, algas, etc., dependiendo del ecosistema en el que se hallen.

Nematodo: lombrices microscópicas que habitan en los suelos, agua, y en los tejidos animales y humanos. Algunas especies de nematodos son beneficiosas para las plantas, aunque existen otras que son dañinas (parásitos) puesto que pueden alimentarse de las raíces, ocasionando un importante impacto en algunos cultivos como las zanahorias o la chirivía.

Nódulo: tumor beneficioso desarrollado en las raíces de algunas especies vegetales. Se forman como consecuencia de la relación simbiótica entre algunas plantas y algunos tipos de bacterias. En el interior de los nódulos, las bacterias son capaces de fijar N_2 de la atmósfera y proporcionarles N a las plantas, mientras que estas les proporcionan nutrientes y energía a las bacterias.

Pared celular: estructura que se localiza en la parte externa de algunas células y que separa una célula de otra. Esta estructura también confiere protección frente a los patógenos y al ambiente, así como soporte físico. Se pueden encontrar paredes celulares en diferentes tipos de organismos como plantas, hongos, bacterias, algas, etc., aunque su composición varía en función del tipo de organismo.

Podredumbre de la raíz: enfermedad ocasionada por diferentes patógenos microbianos como algunos hongos, y por exceso de agua. Aunque los síntomas comienzan en las raíces, se pueden distribuir a la parte aérea y las plantas pueden incluso morir. Los síntomas más comunes son: suelo continuamente húmedo incluso sin haber regado la planta, raíces flácidas, suelo que huele a podrido, crecimiento reducido de la planta, hojas mustias y amarillentas.

Relación simbiótica (simbiosis): relación mutualista entre diferentes organismos, en la cual ambos obtienen beneficios mutuos.

Rizosfera: suelo adherido a las raíces y bajo la influencia de estas. Es rico en compuestos vegetales liberados por las raíces (exudados radiculares, compuestos por carbohidratos, aminoácidos, ácidos orgánicos, etc.) y en microorganismos.