

Recuperación de recursos de aguas residuales

Papá: Nuestra maestra nos dijo esta mañana que no deberíamos desperdiciar más aguas residuales, pero Utilicemos a nuestros amigos microbianos para recuperar recursos valiosos



Imagen diseñada con recursos de Freepik.com

Willy Verstraete(a) and Silvio Matassa(b)

A centro de Ecología y Tecnología Microbiana, Universidad de Gante, Bélgica
B Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectónica y Ambiental, Universidad de Nápoles Federico II, Italia

Recuperación de recursos de aguas residuales

Sinopsis

Los agricultores producen alimentos para nosotros cultivando plantas y animales en la granja. Las plantas obtienen energía para crecer del sol y agua del suelo. Todas las células, las nuestras y las de las plantas, necesitan grandes cantidades de nitrógeno para la producción de proteínas y fósforo para la producción de materiales de información genética y membranas celulares. Como el suelo contiene muy poco nitrógeno en forma química que las plantas puedan utilizar, y tampoco fósforo, los agricultores añaden estos como fertilizantes para aumentar el rendimiento de los cultivos. Comemos los alimentos que producen los agricultores y, en nuestro intestino, nuestros microbios asociados también se alimentan de ellos. Sin embargo, no utilizamos todos estos nutrientes y, cuando vamos al baño, liberamos lo que no usamos, además de todos los microbios que también se han alimentado de nuestros alimentos, en las aguas residuales domésticas. Las aguas residuales domésticas (alcantarillado) contienen cantidades significativas de materia orgánica (alimentos no utilizados, microbios cultivados en nuestro intestino, componentes de la pared intestinal que se reemplazan por otros nuevos, etc.), nitrógeno orgánico y fósforo. La materia orgánica tiene un alto contenido energético y puede ser convertida por microbios especiales, en las condiciones establecidas en los llamados digestores anaeróbicos, en una forma utilizable de energía, concretamente metano, que es una forma de gas natural. Los microbios presentes en las aguas residuales convierten el nitrógeno orgánico de las aguas residuales en amonio. De este modo, el nitrógeno procedente de la explotación agrícola en forma de alimentos se libera y puede capturarse y recuperarse como un recurso valioso (fertilizante de amonio) que podemos reutilizar en la explotación. Los microbios también pueden recuperar fósforo de las aguas residuales. Por último, la matriz acuosa de las aguas residuales también es un recurso valioso y, una vez que se han eliminado de ella la materia orgánica, el nitrógeno y el fósforo, podemos purificarla aún más, por ejemplo, mediante filtración a través de una membrana, y reutilizarla. El reciclaje de las aguas residuales, la recuperación de recursos a partir de ellas y la obtención de agua limpia son aspectos del desarrollo sostenible.

La microbiología y el contexto social

La microbiología: Biotecnología del ciclo del carbono, el nitrógeno y el fósforo impulsado por microbios, reciclaje, recuperación de recursos, conversión de desechos orgánicos en biogás, biotecnología. Cuestiones de sostenibilidad: patrones de producción y consumo, alimentación y agricultura, agua y saneamiento, energía.



Recuperación de Recursos de Aguas residuales: La Microbiología

1. **Las aguas residuales son un recurso valioso.** El agua entra en nuestra casa por una tubería como agua limpia, que utilizamos para diversos fines: beber, lavarnos, lavar la ropa, los platos, tirar de la cadena del inodoro, etc., y sale por otra tubería como aguas residuales. Esta tubería conduce a un canal colector, parte de un sistema más grande llamado alcantarillado. El alcantarillado lleva el agua sucia a la planta de tratamiento de aguas residuales. El alcantarillado también puede recoger agua de lluvia de los tejados y las carreteras, así como aguas residuales de empresas industriales, comerciales y agrícolas. Normalmente, para una ciudad de un millón de habitantes, el volumen de aguas residuales producido cada día es de 250.000 m³ (unos 250 litros por persona y día) que transportan compuestos y materiales que suman entre 150 y 200 toneladas de materia seca al día (entre 150 y 200 gramos por persona y día). Las plantas de tratamiento de aguas residuales tradicionales utilizan microbios para degradar y destruir la mayor cantidad posible de este material. Pero ahora, consideramos las aguas residuales como una fuente de materiales valiosos, que se pueden recuperar y reciclar, y utilizamos conjuntos específicos de microbios para lograrlo. El componente principal de las aguas residuales es materia orgánica procedente de heces, restos de comida, etc., que es rica en energía y puede convertirse en biogás, del que se puede recuperar la energía. Otros materiales valiosos presentes en las aguas residuales son el nitrógeno presente en las proteínas, el fósforo presente en el material genético de todas las células y en algunas grasas, y el agua misma, que cada vez escasea más en muchas partes del mundo.

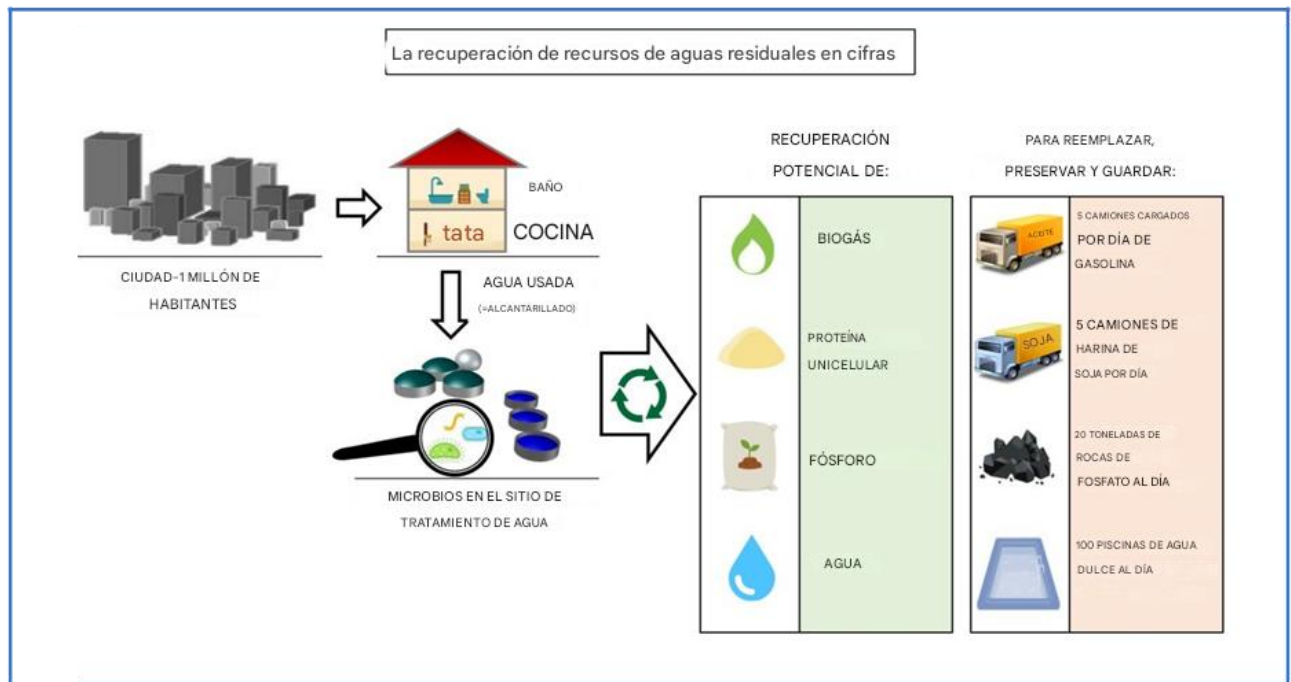
2. **La materia orgánica se puede convertir en biogás.** Los microbios son grandes jugadores de equipo, y cuando los microorganismos, cuando se encuentran en ambientes anaeróbicos (es decir, en los que no hay oxígeno) con materia orgánica, se organizan de una manera especial para descomponer moléculas orgánicas complejas en otras más simples. Esta amplia mezcla de moléculas es utilizada por un tipo específico de microbios, los metanógenos, para producir biogás, compuesto de sólo dos moléculas: metano y dióxido de carbono. El biogás es una fuente útil de energía renovable, que puede sustituir a los combustibles fósiles

Un marco de educación en microbiología centrado

no renovables para proporcionar electricidad y calefacción doméstica, o incluso para alimentar nuestros coches. Para imaginar cuánto biogás podríamos producir a partir de la materia orgánica que se vierte cada día en las aguas residuales, podemos hacer el siguiente cálculo. Digamos, por ejemplo, que consumimos cada día 1,0 kg de materia orgánica (materia seca, compárese con el azúcar) y sólo utilizamos alrededor del 70% de esta para nuestras necesidades directas. El resto representa entonces 0,3 kg de materia orgánica, lo que equivale a unos 0,1 L de combustible fósil. Para una ciudad de 1 millón de habitantes, esto representa unos 100 m³ de equivalentes de combustible fósil o 5 camiones de gasolina por día que, mediante la moderna tecnología de fermentación, se pueden recuperar y reutilizar.

3. *El nitrógeno orgánico se puede convertir en amoníaco.* Todos los organismos necesitan grandes cantidades del nitrógeno se utiliza para la producción de proteínas, como las enzimas que llevan a cabo las reacciones químicas de la célula (su metabolismo), las proteínas reguladoras que controlan el metabolismo, las proteínas estructurales que mueven cosas dentro de la célula y proporcionan su andamiaje, etc. Aunque el nitrógeno gaseoso es el elemento más abundante en la atmósfera de la Tierra, la mayoría de las plantas no pueden utilizarlo (la excepción son las plantas que tienen simbiontes fijadores de nitrógeno en sus sistemas radiculares), y requieren formas más reactivas, como el amoníaco, el nitrato y los compuestos nitrogenados orgánicos (fertilizantes) para crecer. La transformación industrial del nitrógeno gaseoso en fertilizante implica un consumo energético muy elevado, que en última instancia proviene del consumo de combustibles fósiles. Por lo tanto, los compuestos nitrogenados son recursos valiosos y ricos en energía que se pueden recuperar y reutilizar siempre que sea posible. Sin embargo, una vez vertido en las aguas residuales, el nitrógeno orgánico usado es procesado por plantas de tratamiento a través de una serie de procesos de alto consumo energético para obtener nitrógeno gaseoso que regresa a la atmósfera. Cada uno de nosotros consume unos 100 g de proteína por día y excreta unos 14 g de nitrógeno. Para la ciudad de un millón de habitantes mencionada anteriormente, esto representa otros 30 m³ de equivalente de combustible fósil por día. Las tecnologías que se están desarrollando actualmente permitirán la recuperación y reutilización del nitrógeno orgánico en las aguas residuales, por lo que en un futuro próximo ya no destruiremos este nitrógeno en el agua usada, sino que utilizaremos microbios para liberarlo en forma de amonio y luego extraerlo y mejorarlo para producir nuevos alimentos y piensos. En este caso, podríamos utilizar microbios específicos que sean capaces de utilizar fuentes de energía renovables (por ejemplo, hidrógeno, metano, etc.) para convertir directamente el nitrógeno recuperado en piensos y alimentos ricos en proteínas. Incluso podríamos hacer esto en el sitio de tratamiento de agua y así producir el equivalente a 5 camiones cargados de harina de soja por día.

Un marco de educación en microbiología centrado



4. *El fósforo también se puede recuperar.* Todas las células necesitan fósforo para la producción de materiales de información genética (ácidos nucleicos, membranas celulares, la moneda química universal de energía, ATP) y moléculas reguladoras y de señalización celular. El suelo contiene poco fósforo y, el que hay, en su mayoría está presente en forma de complejos o absorbido por los minerales del suelo, y por lo tanto es insoluble y no está disponible para las plantas. Aunque muchos microbios asociados a las raíces solubilizan.

Un marco de educación en microbiología centrado en el niño

Aunque los cultivos contienen fósforo en su entorno inmediato, todavía es insuficiente para el crecimiento máximo de las plantas de cultivo. Por lo tanto, los agricultores añaden fertilizantes de fósforo soluble para aumentar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la producción de fertilizantes requiere un alto consumo de energía: por ejemplo, una tonelada de fertilizante de fósforo producido a partir de rocas ricas en fosfato en el norte de África requiere la extracción de unas 20 toneladas de roca fosfórica. Y, lo que es más importante, las reservas mundiales de fósforo son limitadas y se prevé que las prácticas actuales agoten estas rocas en medio siglo. Por lo tanto, necesitamos conservar las reservas de fósforo, recuperarlo y reutilizarlo, tanto como sea posible. Dado que parte del fósforo añadido por el agricultor como fertilizante es absorbido por las plantas que comemos y luego se libera en las aguas residuales, existe la oportunidad de recuperar al menos una parte del fósforo en circulación. Ciertos microbios, en condiciones específicas, pueden acumular fósforo dentro de sus células y, posteriormente, liberarlo en una forma concentrada que permite su recuperación en el sitio de tratamiento del agua. En términos prácticos, las aguas residuales producidas cada día por una ciudad de un millón de habitantes contienen alrededor de una tonelada de fósforo que ahora puede recuperarse mediante procesos tecnológicos microbianos.

5. *Recuperación de agua limpia.* Lo más importante es que las aguas residuales están compuestas por aproximadamente un 99% de agua, lo que también es muy importante. El agua residual es un recurso muy importante y escaso en muchas partes del mundo. Tras extraer la

Un marco de educación en microbiología centrado

energía, el nitrógeno y el fósforo de las aguas residuales, con la ayuda de nuestros amigos microbianos en la planta de tratamiento, podemos recuperar agua limpia y fresca, lista para reutilizarla para nuestras necesidades diarias, filtrando el agua residual a través de membranas o lechos de arena. Para una ciudad de un millón de habitantes, esto representa un volumen de 250.000 m³ de agua al día. Si la recuperamos y la reutilizamos, no tenemos que obtener esta cantidad de las preciosas y a menudo sobreexplotadas reservas naturales, como las aguas subterráneas y las aguas superficiales.

Está claro que el agua usada es un gran recurso y los microbios son cruciales para que forme parte de la economía cíclica.

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

La recuperación de recursos de las aguas residuales domésticas se relaciona con varios ODS (aspectos microbianos en cursiva), incluidos

- **Objetivo 2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover agricultura sostenible** (acabar con el hambre y la malnutrición, aumentar la productividad agrícola). La producción de fertilizantes nitrogenados consume mucha energía; de hecho, representa entre el 2 y el 3% de toda la energía que se utiliza en el mundo. La recuperación microbiana del nitrógeno de las aguas residuales en una forma que pueda utilizarse como fertilizante, o incluso directamente como pienso o alimento, reduce el consumo de energía y ofrece una solución al problema de la disminución de la productividad agrícola. Las reservas de fósforo son limitadas y se estima que sólo durarán los próximos 50 años. Por lo tanto, la recuperación microbiana del fósforo de las aguas residuales prolonga la vida útil de las reservas disponibles, sin reducir la productividad agrícola.
- **Objetivo 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento a pesar de** (*garantizar agua potable, mejorar la calidad del agua, reducir la contaminación, proteger el agua, ecosistemas relacionados, mejorar la gestión del agua y el saneamiento*) El agua es un bien precioso, el agua es un bien que se utiliza en grandes cantidades para todo tipo de actividades domésticas e industriales. Las reservas de agua, en forma de aguas subterráneas, y las reservas de agua superficial, en forma de ríos, lagos y embalses, se están agotando y la competencia por ellas es cada vez mayor. El problema de la contaminación del agua es ya, o se está convirtiendo, en un motivo de conflictos regionales, como por ejemplo en los países de Oriente Medio. Por ello, la recuperación de agua limpia a partir de aguas residuales tiene una importancia crucial en la gestión del agua en todo el mundo. La eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo mediante procesos microbianos son elementos clave en la recuperación del agua.
- **Objetivo 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos** (*garantizar el acceso a energía limpia, renovable y sostenible y aumentar el uso de energía eficiente*) La creciente población mundial exige cada vez más suministros de energía. Los microbios convierten la materia orgánica rica en energía de las aguas residuales en biogás, que es una forma de energía renovable.

Un marco de educación en microbiología centrado

- **Objetivo 12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles** (*lograr prácticas de producción y uso/consumos sostenibles, reducir la producción de residuos/emisión de contaminantes al medio ambiente, alcanzar ciclos de vida de cero residuos, informar a las personas sobre prácticas de desarrollo sostenible*) Aunque la materia orgánica, el nitrógeno y el fósforo son recursos valiosos, si se liberan al medio ambiente, como ha ocurrido en el pasado, resultan contaminantes. En particular, el nitrógeno y el fósforo promueven el crecimiento de algas en cuerpos de agua superficiales, como lagos, ríos y aguas costeras, que se vuelven eutróficas y, a veces, peligrosas, si las algas que crecen producen toxinas. La recuperación de recursos de las aguas residuales evita así la contaminación por aguas residuales. Además, contribuye sustancialmente a la producción sostenible, en este caso de compuestos de nitrógeno y fósforo, de cultivos alimentarios y a su consumo.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

a. El volumen de aguas residuales que debe tratar una planta de tratamiento de aguas residuales aumenta con el número de viviendas a las que da servicio. Llegado a un punto, alcanza el límite de su capacidad y es necesario crear una nueva, lo que implica un gasto considerable de ingresos fiscales, energía, materiales y, sobre todo, terrenos valiosos. Por ello, todos deben hacer todo lo posible para reducir el volumen de aguas residuales. Las cantidades de agua dulce que se utilizan o de aguas residuales que se liberan en un hogar (su huella hídrica, su huella hídrica) son muy variables, dependiendo, por ejemplo, del tiempo que pasamos bajo la ducha, de la frecuencia con la que tiramos de la cadena, de la cantidad de agua que utilizamos para lavarnos, etc. Un valor típico es de unos 100 litros por persona y día (¡10 cubos!). Tenga en cuenta que esta cantidad se acumula en el alcantarillado y se ve aumentada por otros vertidos de agua. Al limitar el modo en que utilizamos el agua (uso del baño, duchas, etc.), cada uno de nosotros puede influir en la cantidad de agua que debe tratarse.

b. Tradicionalmente, los distintos residuos se han combinado y eliminado como mezclas muy complejas, que son difíciles de tratar. La separación en la fuente y la concentración (cantidad de recurso recuperable por unidad de residuo) son cruciales para un reciclaje adecuado. A medida que se emplean cada vez más procesos microbianos especiales para recuperar recursos de las aguas residuales, se vuelve importante evitar la eliminación de materiales no esenciales, especialmente materiales tóxicos que pueden perturbar los procesos microbianos. Además, el uso excesivo de agua dulce diluirá las aguas residuales y hará que sea más difícil y costoso recuperar recursos de ellas. Por lo tanto, debemos volver a reflexionar sobre el uso de agua dulce, así como sobre la eliminación de agentes de limpieza fuertes, pesticidas, etc.

c. Las redes de distribución de aguas residuales y las plantas de tratamiento también pueden verse perturbadas por materiales sólidos, como toallitas limpiadoras, hilo dental, etc., desechados en las aguas residuales, por lo que debemos considerar rutas de eliminación alternativas.

d. Las grasas y los aceites tienden a fusionarse y solidificarse formando masas más grandes, afectando también a las redes y plantas de tratamiento, por lo que es necesario considerar opciones alternativas de eliminación y reciclaje.

Un marco de educación en microbiología centrado

2. *Políticas comunitarias*

a. La implementación de nuevas tecnologías de recuperación de recursos requiere inversión de capital y por lo general, los costes por persona cuyas aguas residuales deben ser canalizadas y depuradas ascienden a 600 euros para la construcción del alcantarillado y 100 euros para la ingeniería y la construcción de la planta depuradora. El dinero que se utiliza para estos fines no puede emplearse para construir escuelas o campos deportivos.

b. Para que las plantas de tratamiento de aguas residuales funcionen correctamente, es necesario educar al público sobre las rutinas domésticas. Para enseñar estos datos y cifras, es necesario adoptar una decisión política pertinente, que puede integrarse en la educación y las instrucciones sobre el uso sostenible del agua dulce y el vertido de aguas residuales.

c. La concienciación pública sobre la importancia de la recuperación de recursos y la aceptación por parte de los consumidores de los productos recuperados son esenciales para crear las oportunidades de mercado necesarias para que la recuperación de recursos sea económicamente viable. Los habitantes de un pueblo o ciudad deben comprender y aprender a aceptar que el agua que descargan no “desaparece” para siempre, sino que pronto vuelve en forma de diversos productos de recuperación. Estos “hechos de la vida” deben aprenderse mediante campañas de educación y sensibilización.

3. *Políticas nacionales*

a. El uso de fertilizantes, la eutrofización y la contaminación de las reservas de agua subterránea por fertilizantes son un tema de política nacional, por lo que la recuperación y reutilización de N y P de manera más eficiente, y la actualización asociada de las plantas de tratamiento de aguas residuales, pueden caer dentro de esta competencia.

b. De manera similar, garantizar un suministro adecuado de energía renovable es una política nacional, por lo que la recuperación de energía de las aguas residuales cae dentro de esta competencia.

c. Además, en algunos países con escasos suministros de agua dulce, el suministro de agua es una política nacional y la recuperación de aguas residuales puede ser una cuestión de política clave.

Participación de los alumnos

1. *Discusión en clase sobre la naturaleza de las aguas residuales y la recuperación de su valioso recurso. Recursos: ¿Qué deben hacer los políticos para aumentar la recuperación de recursos?*

2. *Concienciación de los alumnos sobre las partes interesadas*

a. ¿Cuánto tiempo me quedo en la ducha? ¿Puedo reducir el consumo de agua dulce y de aguas residuales?

¿huellas?

b. ¿Qué desecho a través del inodoro/lavabo que debería desecharse en un recipiente?

¿De otra manera? ¿Cuáles son las posibles consecuencias?

3. *Ejercicios (se pueden realizar en cualquier nivel, pero probablemente sean de nivel educación secundaria)*

Un marco de educación en microbiología centrado

- a. ¿Cómo podríamos reducir la cantidad de fertilizantes utilizados en la agricultura?
- b. Mirando los ODS, ¿cómo podemos cambiar nuestros hábitos para mejorar el suministro de alimentos, agua y energía?

La base de evidencia, lecturas complementarias y materiales didácticos

- Matassa, S., Batstone, DJ, Huelsen, T., Schnoor, JL, Verstraete, W., 2015a. ¿Puede la conversión directa de nitrógeno usado en nuevos piensos y proteínas ayudar a alimentar al mundo? *Environ. Sci. Technol.* 49, 5247–5254. <https://doi.org/10.1021/es505432w>
- Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I., Verstraete, W., 2016. Proteína microbiana: futura ruta de suministro de alimentos sostenibles con baja huella ambiental. *Microb. Biotechnol.* 9, 568–575. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12369>
- Matassa, S., Boon, N., Verstraete, W., 2015b. Recuperación de recursos a partir de agua usada: las capacidades de fabricación de las bacterias oxidantes de hidrógeno. *Water Res.* 68, 467–478. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.028>
- Pikaar, I., Matassa, S., Rabaey, K., Bodirsky, BL, Popp, A., Herrero, M., Verstraete, W., 2017. Microbios y la próxima revolución del nitrógeno. *Environ. Sci. Technol.* 51. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00916>
- Reichenberger, J., Arora, M., 2015. Convertir aguas residuales en agua reutilizable: escrito para el público en general, Archway Publishing.
- Verstraete, W., Van de Caveye, P., Diamantis, V., 2009. Aprovechamiento máximo de los recursos presentes en el “agua usada” doméstica. *Bioresour. Technol.* 100, 5537–45. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.047>
- Verstraete, W., Vlaeminck, SE, 2011. ZeroWasteWater: reciclaje a corto plazo de los recursos de aguas residuales para las ciudades sostenibles del futuro. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 18, 253–264. <https://doi.org/10.1080/13504509.2011.570804>

Glosario

Digestión anaeróbica: Un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos que, en ausencia de oxígeno, son capaces de descomponer la materia orgánica y producir biogás;

Biogás: una mezcla gaseosa de metano y dióxido de carbono producida durante el proceso de digestión anaeróbica.

Dióxido de carbono: Compuesto gaseoso producido por la oxidación del carbono orgánico mediante procesos biológicos o termoquímicos. El dióxido de carbono constituye casi el 50% del biogás y, como gas de efecto invernadero, contribuye al calentamiento global cuando se acumula en la atmósfera;

Eutrofización: una cascada de procesos que conducen al crecimiento excesivo de algas en los cuerpos de agua, lo que finalmente resulta en agotamiento del oxígeno y falla y muerte de los ecosistemas acuáticos.

La eutrofización es causada por la descarga de aguas residuales que contienen altos niveles de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo;

Fertilizantes: un material utilizado en la agricultura para proporcionar nutrientes para el crecimiento de las plantas;

Un marco de educación en microbiología centrado

Gases de efecto invernadero: Compuestos gaseosos que provocan un aumento del efecto invernadero natural de la atmósfera terrestre y, por tanto, contribuye al calentamiento global.

Metano: Compuesto por carbono e hidrógeno, el metano es el componente principal del biogás y tiene un potencial de gas de efecto invernadero 25 veces mayor que el dióxido de carbono. El metano es un valioso vector energético y puede quemarse para producir energía y calor o usarse como combustible para el transporte; **Proteína microbiana:** Material biológico rico en proteínas producido por microorganismos como parte de su metabolismo natural. La proteína microbiana se puede utilizar en la nutrición animal y humana, como fertilizante orgánico o incluso como bloque de construcción para polímeros biodegradables como los bioplásticos; **Microbioma:** un equipo de microorganismos seleccionados que pueden cooperar y realizar tareas complejas juntos;

Recuperación de recursos: Una serie de procesos y prácticas encaminadas a recuperar materiales valiosos de los desechos y su puesta a disposición para la fabricación de nuevos productos; **Planta de tratamiento de aguas residuales:** Instalación diseñada para tratar las aguas residuales mediante una serie de procesos biológicos y físico-químicos. Se eliminan contaminantes como sustancias orgánicas y nutrientes para que las aguas residuales puedan verterse en cuerpos de agua naturales;