

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

Uso de Microbios para fabricar Biocombustibles

Abuelo: Cuando visitamos a nuestros parientes durante las vacaciones de primavera, vi una pegatina en el avión que decía «biocombustible sostenible». ¿Qué es el biocombustible y es bueno para el medio ambiente?



Juan L. Ramos¹, Ben Pakuts², Patricia Godoy¹, Ana García-Franco¹ y Estrella Duque¹

¹Estación Experimental del Zaidín, CSIC, Granada, España y ²Universidad Health Network, Toronto, Canada

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

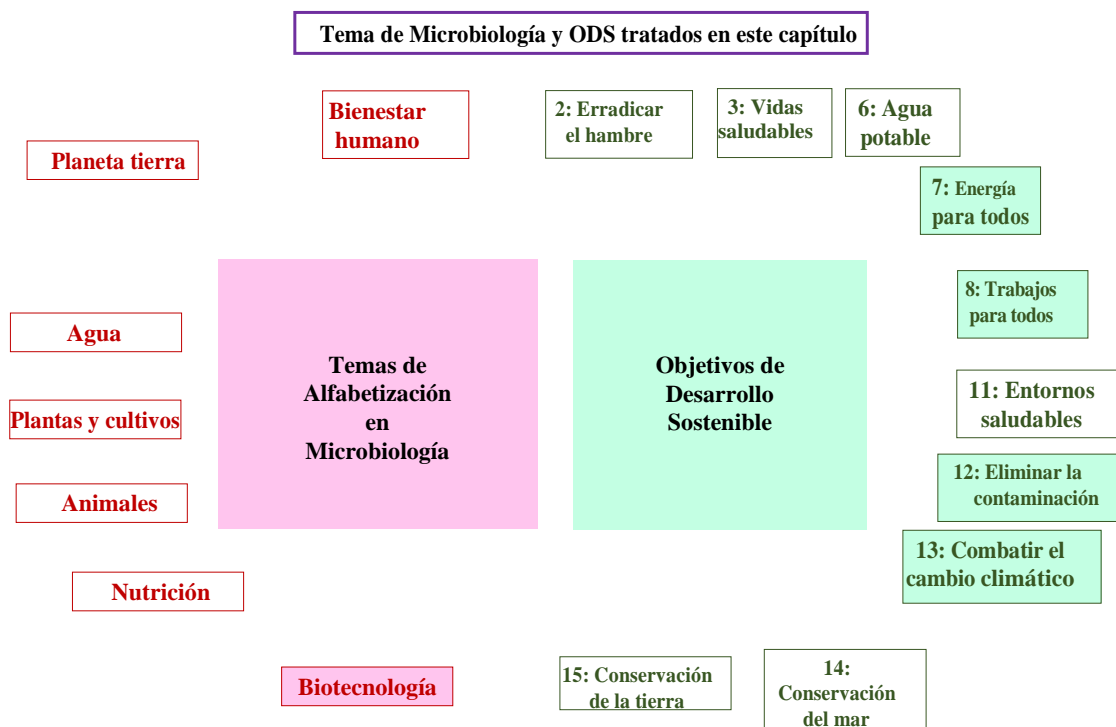
Uso de Microbios para fabricar Biocombustibles

Sinopsis

Gran parte de la energía que utilizamos para nuestras vidas procede de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo. Estas fuentes de energía no son renovables, se están agotando y además contaminan el aire, el agua y el suelo con sustancias químicas tóxicas. Su extracción, transporte, refinado y uso están asociados a una gran huella de carbono que contribuye significativamente al calentamiento global. La sustitución de los combustibles fósiles por formas de energía limpias y renovables es primordial para crear un futuro sostenible y saludable. Los microbios son capaces de producir biocombustibles a partir de materiales vegetales, es decir, compuestos idénticos o equivalentes a los de los combustibles fósiles. El desarrollo de la industria de los biocarburantes nos permitirá obtener energía de fuentes renovables y creará nuevos empleos rurales de alta calidad. El bioetanol y el biodiésel están actualmente en el mercado, pero se está avanzando hacia combustibles más sofisticados.

La Microbiología y el Contexto Social

Microbiología: conversión microbiana de materiales vegetales en bio-alcoholes, biodiésel y biogás. Cuestiones de sostenibilidad: energías renovables, seguridad energética, producción de gases de efecto invernadero/calentamiento global, contaminación ambiental, estabilidad del empleo rural.



Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

Uso de Microbios para fabricar Biocombustibles: la Microbiología

1. **La necesidad de combustibles renovables.** La revolución industrial de finales del siglo XIX marcó el inicio de la era moderna. A lo largo del siglo XX y hasta la actualidad se han dado enormes saltos económicos y tecnológicos. Las mejoras en la producción de bienes y los avances en medicina han contribuido a aumentar la esperanza de vida en todo el mundo. El aumento de la población humana, combinado con el desarrollo y la expansión del transporte terrestre, marítimo y aéreo, han dado lugar a un mundo altamente conectado. Combinados, estos cambios han provocado un enorme aumento de la demanda de energía.

Con la prohibición del uso de la energía nuclear en algunos países, debido a problemas de seguridad a corto y largo plazo, y las naciones trabajando para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (es decir, petróleo, carbón, gas natural, etc.) debido a sus efectos contaminantes, nos enfrentamos a la necesidad de desarrollar otras formas de crear energía. Estas fuentes alternativas de energía pueden proceder de la luz solar (es decir, fotovoltaica y termosolar), el viento, las mareas oceánicas y los microbios. Ningún medio de producir energía por sí solo es suficiente para cubrir la demanda energética mundial, sin embargo, cuando se desarrollan y se utilizan simultáneamente, estos enfoques pueden ser suficientes para satisfacer la demanda actual y futura.

Biocombustibles. Los Protocolos de Kioto y el más reciente Acuerdo de París sobre el Clima exigen el uso de combustibles limpios, ecológicos y renovables para el transporte que sustituyan a la gasolina, el gasóleo y el combustible para aviones. Los biocarburantes son combustibles producidos a partir de materiales biológicos, en la mayoría de los casos granos de cereales, caña de azúcar o biomasa derivada de plantas o residuos, y representan una alternativa prometedora a los combustibles fósiles. Los biocombustibles se consideran combustibles renovables porque proceden de materiales vegetales que se fabrican a partir de la fijación de CO₂ mediante fotosíntesis que es alimentada por la luz solar: las plantas pueden cultivarse continuamente para proporcionar un suministro constante en contraste con el suministro en constante disminución de los materiales combustibles fósiles.

En Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea se han puesto en marcha varios programas de biocombustibles con el objetivo no sólo de reducir las emisiones, sino también de disminuir la importación de combustibles fósiles y aumentar la seguridad del abastecimiento nacional de carburantes. Los biocombustibles ofrecen una serie de ventajas sociales, económicas, medioambientales y técnicas, entre las que destacan: moderación de los precios del petróleo, creación de empleo rural, reducción de las emisiones globales de carbono y disminución de la erosión del suelo. Dicho esto, han surgido controversias, como el temor a que el uso de tierras agrícolas para la producción de biocombustibles ponga en peligro la producción de alimentos (el debate “alimentos contra combustibles”).

Biocombustibles y emisiones. Aunque el uso de biocombustibles para vehículos de motor reduce significativamente las emisiones netas, se ha propuesto que, para que un biocombustible sea una alternativa viable a los combustibles fósiles, debe proporcionar una ganancia neta de energía,

- a. tener beneficios medioambientales,
- b. ser económicamente competitivo, y
- c. producirse en grandes cantidades sin reducir el suministro de alimentos.

Como las plantas utilizan CO₂ para crecer, y el CO₂ es un gas de efecto invernadero, reducen las emisiones netas de gases de efecto invernadero, cumpliendo así la condición b. Sin embargo, para que un biocombustible específico sea neutro en carbono, el carbono total

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

secuestrado por la planta debe compensar todas las emisiones vinculadas a la producción y fabricación de un biocombustible determinado. Estas emisiones incluyen las causadas por los cambios directos o indirectos en el uso de la tierra, la cantidad de carbono secuestrado y la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos. En general, lograr la neutralidad de carbono para los biocarburantes requiere un alto rendimiento de las plantas y bajas emisiones.

A pesar del potencial que representan los biocombustibles, las estimaciones actuales indican que sólo alrededor del 1% de la energía utilizada en el mundo puede remontarse a una fuente de biocombustible. Por lo tanto, existen grandes oportunidades para aumentar el uso de combustibles renovables. Datos más recientes sugieren que, en ciertos sectores, el uso de biocombustibles está ganando tracción: los datos de 2018 estiman que la producción mundial de biocombustibles alcanzó los 152 mil millones de litros (40 mil millones de galones estadounidenses) y proporciona alrededor del 3% del combustible mundial para el transporte por carretera. Con el fin de reducir la dependencia del petróleo, varios organismos internacionales y gobiernos tienen como objetivo utilizar biocombustibles para suministrar el 25% de su energía para el transporte en 2050. En este marco temático, nos centraremos en los conceptos fundamentales que subyacen a la producción de biocombustibles mediante microbios.

2. **Cultivos para biocombustibles.** Las plantas para cultivos energéticos se cultivan específicamente para la producción de biocombustibles. Varían según la geografía: por ejemplo, el maíz, la soja, los sauces y el pasto varilla son cultivos energéticos habituales en Estados Unidos, la colza, el trigo, la remolacha azucarera y los sauces se cultivan preferentemente en el norte de Europa, la caña de azúcar se cultiva en Brasil, el aceite de palma y el *Miscanthus giganteus* (hierba plateada gigante) se cultivan en el sudeste asiático, y el sorgo y la mandioca se cultivan en China. En todo el mundo, el grano de maíz y la caña de azúcar son los cultivos más comunes para biocombustibles, mientras que se cree que el *Miscanthus* es el cultivo más eficiente para biocombustibles. Además del material vegetal, las algas y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos también se consideran materias primas biológicas para la producción de biocarburantes.

Según el origen del material biológico, los biocombustibles se denominan de primera, segunda, tercera o cuarta generación. Los biocombustibles de primera generación son rentables en Estados Unidos, pero no tanto en Europa, los de segunda generación requieren subvenciones públicas, y los de tercera y cuarta generación no se consideran rentables en la actualidad.

3. **Biocombustibles de primera generación (1G).** Los biocombustibles de primera generación son biocombustibles convencionales producidos a partir de cultivos alimentarios cultivados en tierras cultivables. Las plantas pueden cultivarse explícitamente para la producción de biocarburante. El azúcar, el almidón o el aceite vegetal obtenidos de los cultivos se convierten en biodiésel o etanol. Esto puede ocurrir por transesterificación o por fermentación mediada por levaduras o bacterias. El impulso para introducir en el mercado los biocombustibles de primera generación se debió a la percepción de que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, y también a factores como las subidas del precio del petróleo y la necesidad de aumentar la seguridad energética.

Sin embargo, los biocombustibles de primera generación se vieron envueltos en la polémica porque, al competir por las tierras cultivables, pronto se percibieron como una amenaza para la producción agrícola de alimentos y la seguridad alimentaria. La contaminación asociada a los biocombustibles de primera generación también se convirtió en un punto de controversia, especialmente después de que el químico ganador del premio Nobel

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

Paul J. Crutzen publicara hallazgos que indicaban que las emisiones de óxido nitroso (N_2O) - un potente gas de efecto invernadero- realizadas durante la producción de biocombustibles podrían contribuir más al calentamiento global que la cantidad de CO_2 fijada.

Para superar estos retos, la industria se ha centrado en el desarrollo de biocombustibles utilizando fuentes alternativas de materiales biológicos y nuevas tecnologías innovadoras, que han dado lugar a los biocombustibles de segunda generación.

4. **Biocombustibles de segunda generación (2G).** Los biocombustibles de segunda generación se obtienen a partir de biomasa lignocelulósica o cultivos leñosos, residuos agrícolas y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Por lo tanto, las materias primas utilizadas para generar biocombustibles de segunda generación o bien son subproductos de otros cultivos (es decir, cultivos alimentarios en tierras de cultivo), o bien se cultivan en tierras que no pueden utilizarse para cultivar alimentos de forma eficaz.

La selección de la tierra en la que se cultiva la materia prima es un factor determinante para la sostenibilidad del biocombustible, y una consideración clave es minimizar la competencia entre el uso de la tierra para la producción de biocombustibles y la producción de alimentos. En general, los biocarburantes de segunda generación evitan esta competencia y no utilizan agua ni fertilizantes adicionales.

El uso de residuos municipales y domésticos para la producción de biocarburantes es un enfoque emergente que aprovecha una biomasa que actualmente es un recurso en gran medida desaprovechado. El uso de esta biomasa como fuente de energía tiene el potencial de mejorar la gestión de los residuos, la seguridad del combustible y ayudar a hacer frente al cambio climático.

5. **Biocarburantes de tercera generación (3G).** El biocombustible de tercera generación se produce a partir de algas. Se trata de cultivar algas con un alto contenido natural de aceite en estanques de plantas de tratamiento de aguas residuales. Las algas ricas en aceite se cosechan y se transforman en biocarburantes. En la actualidad, debido a los complejos requisitos de procesamiento y a la caída de los precios de los combustibles, estos biocombustibles no son competitivos en costes y no se espera que lo sean a corto o medio plazo.

La ventaja de la alguicultura es que no compite con la producción de alimentos porque no requiere tierras de cultivo ni agua dulce. Uno de los enfoques consiste en la producción de hidrógeno y amoníaco a partir de microbios fotosintéticos, como las cianobacterias *Anabaena* o las bacterias del género *Rhodospseudomonas*. En general, los rendimientos globales de los biocombustibles de tercera generación están limitados por las eficiencias de conversión de luz en energía y las concentraciones de los productos producidos. Aunque el hidrógeno producido a partir del agua representa el combustible más limpio que existe, antes de que los biocombustibles de tercera generación sean viables, se requieren análisis tecnoeconómicos detallados para definir las condiciones necesarias para lograr una producción rentable a nivel industrial.

6. **Biocombustibles de cuarta generación (4G).** Los biocombustibles de cuarta generación incluyen los electrocombustibles y los combustibles solares fotobiológicos. En la actualidad, estos combustibles no se consideran una fuente realista de energía. Las pilas de combustible microbianas convierten la energía química almacenada en las aguas residuales o el suelo en energía eléctrica mediante procesos metabólicos presentes en el interior de microorganismos electrogénicos. La capacidad de generación de energía de esta tecnología no es actualmente viable desde una perspectiva económica.

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

7. **Tipos de biocombustibles.** Todos los biocombustibles pueden producirse en forma líquida (alcoholes, biodiésel) o gaseosa (biogás). A continuación describimos una selección de los combustibles actualmente en uso.

a. Biocombustibles alcohólicos

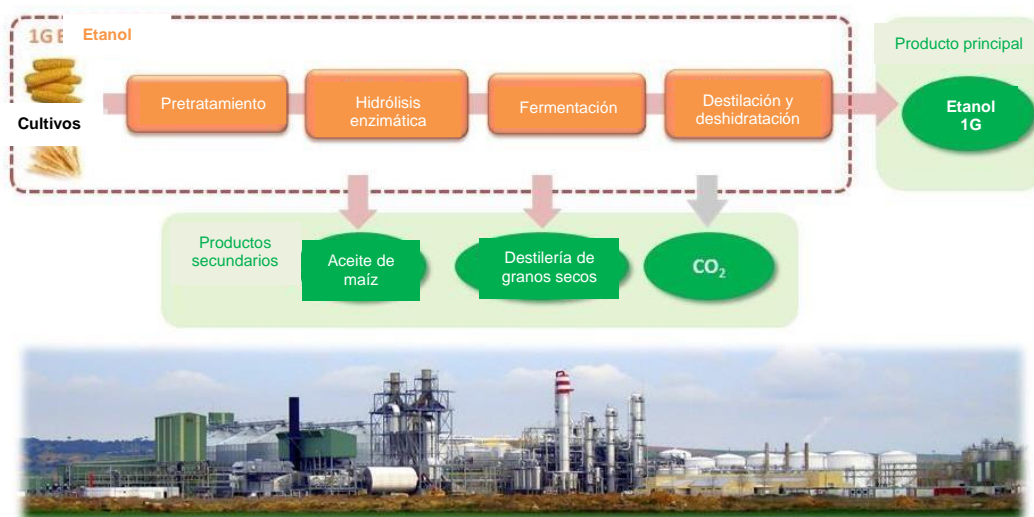
i. Bioetanol.

Actualmente, el bioetanol es la materia prima de producción biológica más relevante. Casi todo el etanol utilizado en el mundo para la industria farmacéutica, de disolventes y de combustibles se produce mediante fermentación biológica. El bioetanol es un combustible 1G que se produce comúnmente en todo el mundo, sobre todo en Brasil y Estados Unidos. El alcohol combustible se produce a través de la fermentación de azúcares derivados principalmente del grano de maíz y de la caña de azúcar, así como de la remolacha azucarera, del grano de trigo (u otros granos de cereales), de la melaza y de diversas otras plantas, incluyendo frutas y residuos de frutas. La figura 1 resume el proceso con granos de cereales.

En el caso del grano, el primer paso de la producción de biocombustible es la hidrólisis del almidón mediante amilasas. Este proceso produce azúcares simples -principalmente glucosa- que luego se fermentan en etanol mediante microorganismos como levaduras o bacterias (por ejemplo, *Zymomonas*). En Estados Unidos, los molinos de maíz seco producen entre 14.000 y 15.000 millones de galones de etanol al año. Estos molinos no sólo producen etanol, sino también aceite de maíz y granos secos de destilería, que se utilizan como pienso animal. El CO₂ producido durante la fermentación se recoge y se utiliza para bebidas carbonatadas o para usos médicos. Esta tecnología de etanol de primera generación está bastante madura y las plantas industriales de etanol suelen ser rentables en Estados Unidos. En Brasil se producen anualmente unos 5.000 millones de galones de etanol y los residuos sobrantes (es decir, el bagazo) suelen quemarse en las fábricas para generar energía extra.

Tecnología de etanol de primera generación

- Cerca del 98% del etanol es biológicamente producido
- La producción total mundial es de 25 billones de galones anuales



Esquema de las etapas de la producción de etanol 1G a partir de cereales. Se utiliza agua caliente para generar un puré de maíz, que posteriormente se somete a hidrólisis enzimática con amilasas, que liberan azúcares del almidón. A continuación, la levadura o las bacterias fermentan la glucosa para producir etanol, que finalmente se destila y deshidrata para su uso comercial. Además de etanol, las fábricas de 1G producen aceite de maíz, cosechan CO para usos industriales y medicinales, y generan un sustrato

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

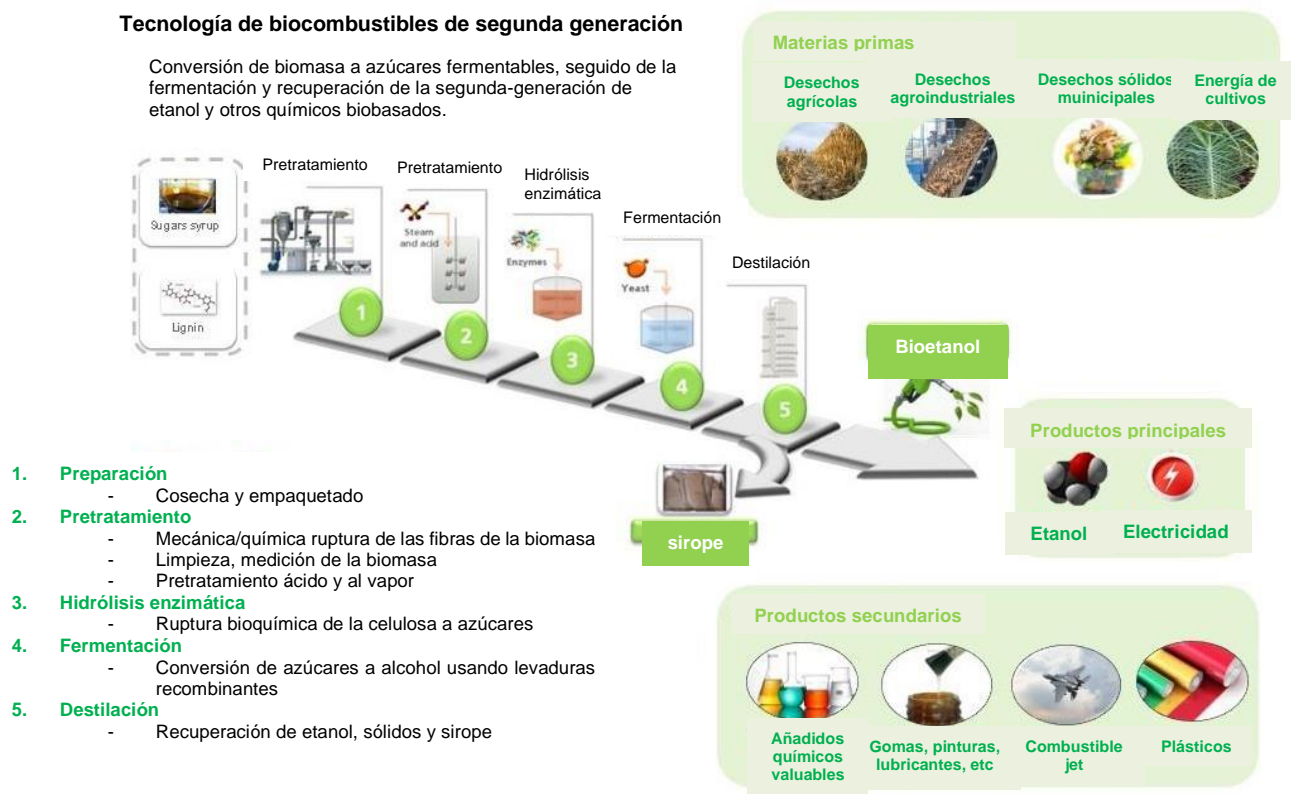
sólido llamado «grano seco de destilería con solubles», que es un excelente alimento para rumiantes. La imagen inferior muestra la planta de etanol 1G de BCyL en Salamanca (España).

El etanol puede utilizarse como combustible para vehículos en su forma pura (E100), pero suele emplearse como aditivo de la gasolina para aumentar el octanaje y disminuir las emisiones de los vehículos. Los motores de gasolina de los coches modernos pueden funcionar con mezclas de hasta un 10% (v/v) de bioetanol con gasolina (E10), sin embargo, hay que tener en cuenta que el etanol tiene una densidad energética menor que la gasolina. Por esta razón, se necesita más combustible (volumen y masa) para producir la misma cantidad de trabajo.

En un intento de abordar la controversia “alimentos frente a combustibles”, la industria de los biocombustibles buscó nuevas fuentes de materias primas. Esto era necesario no sólo para abordar la cuestión anterior, sino también porque se calculó que, si todo el maíz de Estados Unidos se utilizara para producir biocombustibles, sólo satisfaría el 12% de la demanda de gasolina (Hill *et al.*, 2006). Así, la industria ha empezado a estudiar la utilización de los residuos agrícolas sobrantes tras la cosecha como materia prima para la producción de bioetanol.

Tecnología de biocombustibles de segunda generación

Conversión de biomasa a azúcares fermentables, seguido de la fermentación y recuperación de la segunda-generación de etanol y otros químicos biobasados.



Esquema que muestra los pasos desde la biomasa hasta la producción de bioetanol. Las plantas de etanol 2G llevan a cabo tres pasos clave (es decir, los pasos 2, 3 y 4 en la parte superior izquierda del esquema). Los tres núcleos corresponden a los procesos desarrollados por Abengoa Bioenergía. Además de etanol, las plantas de 2G producen lignina de alta calidad y diferentes jarabes que pueden transformarse en productos químicos de valor añadido.

La producción de bioetanol 2G suele requerir tres etapas principales: i) el pretratamiento fisicoquímico de la biomasa, para que los polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) del material lignocelulósico sean accesibles a las celulasas y hemicelulasas utilizadas para convertir azúcares complejos en azúcares simples, ii) la descomposición enzimática de los componentes de la biomasa (es decir, celulosa y hemicelulosa) en azúcares constituyentes, y iii) la fermentación mediante levaduras especializadas.

En la actualidad, los principales obstáculos a los que se enfrenta el etanol 2G parecen

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

derivarse de problemas mecánicos en la manipulación de los materiales y el funcionamiento eficiente de las unidades de pretratamiento. Otro obstáculo importante es el precio de los cócteles enzimáticos necesarios, que actualmente cuestan un orden de magnitud más que las amilasas. La principal fuente de estos cócteles son las enzimas secretadas por los hongos, que las utilizan para crecer en material vegetal, como hojarasca, madera muerta, etc., metabolizando residuos lignocelulósicos. Estos cócteles enzimáticos pueden permitir la liberación de >80% de los azúcares monosacáridos que están presentes en las celulosas y hemicelulosas. La mayor parte del azúcar utilizado para producir etanol en los procesos 1G es glucosa. Aunque la glucosa también es el azúcar predominante en los procesos 2G (aproximadamente el 75% del total de azúcares), también intervienen cantidades significativas de otros azúcares, como la xilosa (23%) y la arabinosa. La fermentación de los azúcares liberados por el rastrojo de maíz, el bagazo y otros residuos agrícolas requiere el uso de levaduras especializadas capaces de fermentar simultáneamente la glucosa y la xilosa. Las levaduras utilizadas en las fermentaciones 2G están modificadas genéticamente para convertir más del 96% de la glucosa y más del 90% de la xilosa en etanol, con rendimientos globales de fermentación superiores al 90% del máximo teórico, un logro que demuestra hasta qué punto ha progresado esta tecnología.

En términos de disponibilidad, la madera de los bosques tiene el potencial de servir como fuente importante de materias primas para biocombustibles no alimentarios, y esta disponibilidad ha empezado a atraer la atención como recurso renovable mundial de fibra para la producción de etanol. Esto es especialmente cierto cuando los árboles para cultivos energéticos se cultivan en suelos marginales que no pueden soportar la agricultura. Entre las diversas maderas forestales, los sauces han demostrado un alto potencial para su uso en la producción de biocombustibles, porque producen grandes cantidades de azúcar accesible, son de crecimiento rápido y pueden tolerar condiciones ambientales duras, como laderas ventosas.

También está empezando a cobrar impulso una industria para la producción de etanol celulósico a partir de residuos agrícolas. Este planteamiento ofrece importantes oportunidades a toda una serie de agentes, como agricultores, empresas de biotecnología, promotores de proyectos e inversores. Sin embargo, en la actualidad este sector se encuentra todavía en una fase incipiente y requiere importantes subvenciones antes de poder madurar.

Otra fuente de material celulósico es la fracción orgánica recuperada de los residuos sólidos urbanos (RSU). Las tecnologías utilizadas en estos procesos son muy similares a las empleadas para la producción de etanol a partir de rastrojo o bagazo de maíz, con el requisito añadido de una serie de pasos iniciales para separar la fracción orgánica de otros materiales presentes en la biomasa residual.

Un estudio de Turner y colaboradores (2015) subrayó la importancia de garantizar que los RSU procedan de fuentes sostenibles. Si los RSU se obtienen correctamente, su uso podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 65%, incluso teniendo en cuenta todas las posibles emisiones indirectas. En Estados Unidos, la fracción orgánica de los RSU es de aproximadamente el 61%, según la EPA. Si los 164 millones de toneladas que actualmente se desvían a los vertederos se convirtieran en bioetanol, podrían producirse unos 7.500 millones de galones de etanol, el equivalente a unos 250 millones de barriles de gasolina. Además, se calcula que los biocombustibles procedentes de RSU y residuos agrícolas podrían sustituir al 16% del combustible utilizado por el sector del transporte de Estados Unidos en 2030. De cara a 2050, existe un gran potencial para la producción de biocarburantes a partir de materiales vegetales no comestibles y residuos de RSU.

ii. Biobutanol.

El biobutanol (también llamado biogasolina) suele citarse como posible sustituto de la gasolina porque puede utilizarse directamente en motores de combustión interna. En el pasado,

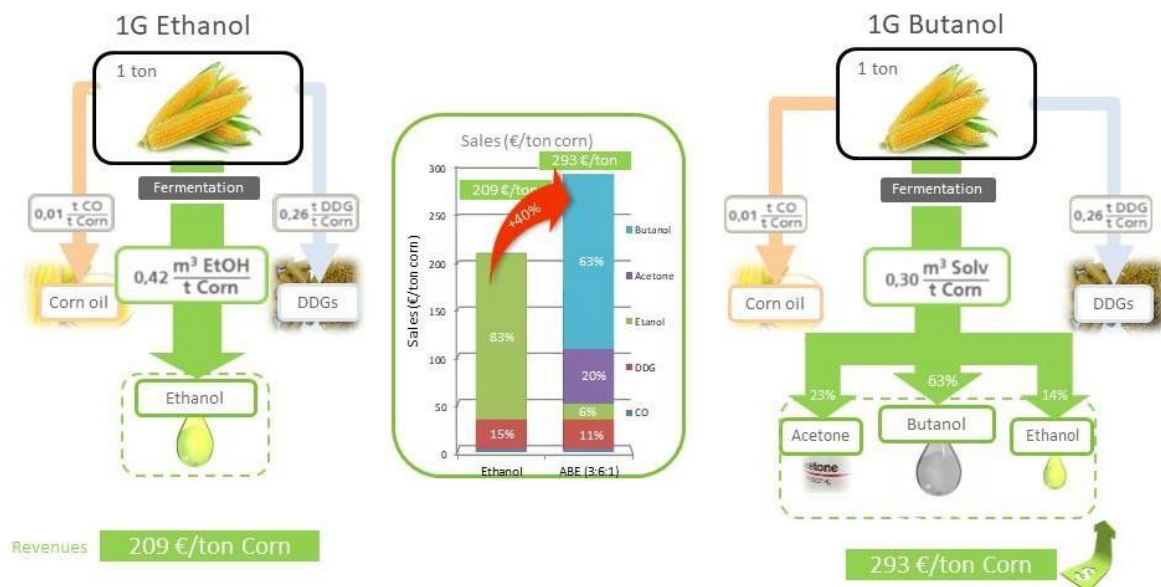
Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

el butanol se producía mediante lo que se conoce como fermentación ABE, un proceso anaeróbico llevado a cabo eficazmente por una serie de cepas del género *Clostridium* que producen una mezcla de acetona, butanol y etanol en una proporción de 1:6:1. Aunque la fermentación de EBA ha sido sustituida desde entonces por la producción química de butanol a partir de la gasolina, se han iniciado varios esfuerzos de investigación para aumentar la proporción de butanol que puede producirse mediante fermentación, esfuerzos que han conducido a procesos capaces de producir una proporción de EBA de 1:8:1. Estos avances se han logrado mediante el desarrollo de cepas de *Clostridium* con una vía metabólica modificada genéticamente, así como mediante la selección de cepas capaces de soportar concentraciones de butanol más elevadas. Con más investigación, avances técnicos e inversiones de la industria, el biobutanol puede llegar a ser más rentable que el etanol. Además, varias cepas de clostridios son capaces de degradar material lignocelulósico (es decir, procedente de desechos agrícolas, residuos forestales, etc.), lo que sugiere que es factible una industria de biobutanol de segunda generación.

Quienes apoyan un cambio hacia la producción de butanol señalan tres beneficios clave: (i) el butanol tiene una mayor densidad de combustible que el etanol y es menos corrosivo, (ii) se puede añadir a la gasolina en una proporción de mezcla más alta, la denominada BUT16, y (iii) es altamente compatible con los sistemas de distribución de petróleo existentes, incluidas las bombas de combustible. Sin embargo, el butanol también tiene algunas desventajas en comparación con el etanol, ya que tiene un octanaje más bajo y un calor de evaporación más bajo.

Revenue Comparison: Ethanol Versus Butanol

Butanol technology could increase 1G ethanol plant revenue per ton of corn



Esquema que compara la producción de bioetanol y biobutanol. Los valores indicados corresponden al procesamiento de 1 tonelada de grano de maíz. El biobutanol tiene una serie de ventajas sociales y ambientales sobre el bioetanol y es económicamente más rentable.

b. Biodiesel

El biodiesel, otro combustible para el transporte, se puede producir a partir de restos de productos alimenticios. El biodiesel es el biocombustible más común en Europa y se genera mediante un proceso que implica la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales. Puede utilizarse como combustible para vehículos en su forma pura (B100) y, como el biodiésel

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

es un combustible oxigenado y tiene un mayor contenido de hidrógeno y oxígeno que el diésel estándar, su combustión genera menores emisiones de partículas y monóxido de carbono. Sin embargo, el uso de biodiésel puro puede aumentar las emisiones de óxido nítrico, un gas de efecto invernadero. El biodiésel se produce principalmente a partir de aceites vegetales y los microbios desempeñan sólo un papel menor en el proceso. Sin embargo, cabe mencionar que varios hongos acumulan grandes cantidades de ácidos grasos que se convierten fácilmente en alcanos. Uno de estos hongos oleaginosos es una cepa de *Aspergillus* que es capaz de producir un 20% más de ácidos grasos que los hongos normales, Algunas cepas de este hongo pueden producir ácidos grasos directamente a partir de azúcares libres y materiales celulósicos.

c. Biogas

Los productos biodegradables de la industria, la agricultura, la silvicultura y los hogares se pueden utilizar para la producción de biocombustibles mediante digestión anaeróbica para producir biogás. La producción anaeróbica de biogás es catalizada por metanógenos, que digieren el material dentro de un sistema cerrado, conocido como digestor anaeróbico, biodigestor o biorreactor. El biogás es principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y el metano puede quemarse u oxidarse con oxígeno, liberando energía. Las tecnologías avanzadas de tratamiento de residuos pueden producir biogás que comprende entre un 55% y un 75% de metano. Los reactores con líquidos libres pueden producir gas que comprende entre un 80% y un 90% de metano utilizando técnicas de purificación de gas in situ. El biogás es una fuente de energía renovable porque su ciclo de producción y uso es continuo y el proceso no genera dióxido de carbono neto. Además, el subproducto sólido, conocido como digestato, puede utilizarse como fertilizante. El biogás también puede comprimirse después de eliminar el dióxido de carbono y utilizarse para impulsar vehículos de motor, y se puede limpiar y actualizar para cumplir con los estándares de gas natural.

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Grandes Retos

Los biocombustibles representan un conjunto de combustibles renovables que contribuyen a sustituir a los combustibles fósiles. Aunque existen controversias como la de alimentos frente a combustibles, la combustión de biocombustibles es más limpia que la de los combustibles fósiles y también sirve para reducir la emisión de sustancias químicas tóxicas. Los biocombustibles también fomentan el uso de tierras y terrenos marginales para cultivos energéticos, lo que conlleva la creación de empleos rurales estables y de alta calidad. El bioetanol y el biodiésel son actualmente protagonistas del mercado y tienen capacidad para sustituir a la gasolina y el gasóleo en los motores de combustión.

El valor de los biocombustibles va más allá de su uso como combustibles para el transporte, y debe prestarse atención a los beneficios económicos y medioambientales de los coproductos de los biocombustibles. Tanto la industria de los biocarburantes 1G como la de los 2G sirven para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir nuestra dependencia del petróleo crudo, fomentar la diversidad energética y promover la creación de empleo rural. En la actualidad, el éxito a largo plazo del etanol 2G requiere incentivos financieros y normativas de apoyo, que son fundamentales para impulsar la producción comercial y la adopción de biocombustibles avanzados.

El campo de la investigación sobre biocombustibles es un ámbito excepcionalmente dinámico y apasionante que tiene el potencial de transformar nuestra forma de producir energía. Tiene la clave para crear una economía más sostenible y circular, y se basa en materiales de partida que actualmente se consideran residuos. Existe un enorme impulso para el desarrollo de tecnologías genómicas asequibles, y éstas van a ser fundamentales para la próxima generación

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

de combustibles. La revolución de la biología sintética está permitiendo el desarrollo de nuevos biocombustibles capaces de sustituir al queroseno. Estos nuevos combustibles ayudarán a reducir las emisiones de CO₂ de diversas actividades humanas, como el transporte y los vuelos. Los biocombustibles están muy alineados con las metas de los ODS de la ONU porque tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, reducir la contaminación, promover la seguridad energética y crear empleos rurales estables y de alta calidad.

Como parte de la agenda mundial de desarrollo de la ONU, y tal y como se recoge en el último documento final de la cumbre, los ODS constituyen una iniciativa fundamental hasta 2030. Aunque los ODS no son tratados jurídicamente vinculantes, su realización está impulsada por compromisos morales y políticos. Uno de ellos obliga a los países de la ONU a avanzar hacia el uso responsable de las energías y la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes renovables ecológicas como los biocombustibles.

Base empírica, lecturas complementarias y material didáctico

- Crutzen, P. J., Mosier, A. R., Smith, K. N., Winwater, W. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. (2008). *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 389–395, 2008. <https://doi.org/10.5194/acp-8-389-2008>.
- Fargioni, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., and Hawthorne, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. (2008). *Science* 319: 1235–1238. DOI:10.1126/science.1152747.
- Green, E.M. Fermentative production of butanol – the industrial perspective. (2011). *Curr Opin Biotechnol* 22: 337–343. doi: 10.1016/j.copbio.2011.02.004.
- Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Poloski, S., and Tiffany, D. Environmental, economic and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol fuels. (2006). *Proc Natl Acad Sci USA* 30: 11206–11210.
- Mohr, A. and Raman, S., Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels. (2013). *Energy Policy*. 63: 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.033>.
- Ramos, J. L. and Duque, E. Twenty-first-century chemical odyssey: fuels versus commodities and cell factories versus chemical plants. (2019) *Microb Biotechnol*. 12, 200-209, doi:10.1111/1751-7915.13379
- Subhash, G, V., Mohan, S. V. Biodiesel production from isolated oleaginous fungi *Aspergillus* sp. using corncob waste liquor as a substrate. (2011). *Bioresource Technol* 102: 9286-9290. doi: 10.1016/j.biortech.2011.06.084.
- Teter J., Le Feuvre P., Gerner M., Scheffer S., Cazzola P., Petropoulos A., et al. "Transport biofuels – tracking transport analysis". IEA. Paris. (2019). International Energy Agency.
- Turner, D.A., Williams, I. D. and Kemp, S. Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials (2015). *Resource, Conservation and Recycling* 105: 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.026>.
- United Nations. (2016) Conference on trade and development: Prosperity for all. URL <http://unctad.org/en/Pages/DITC/ClimateChange/unctad-Biofuels-Initiative.aspx>.
- Valdivia M., Galán, J. L., Laffarga, J. and Ramos, J. L. Biofuels 2020: Biorefineries based on lignocellulosic materials (2016). *Microb. Biotech* 9(5), 585–594 doi:10.1111/1751-7915.12387