

Tecnologías para la industria alimentaria

Fermentación en sustrato sólido



Ministerio
de Economía
República Argentina

Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca

Tecnologías para la industria alimentaria

Fermentación en sustrato sólido

La integración de tecnología en la industria alimentaria es fundamental para aumentar la competitividad, optimizar procesos, reducir costos y garantizar productos de alta calidad. Por este motivo, desde la Dirección Nacional de Alimentos y Desarrollo Regional hemos elaborado esta ficha, que ofrece un análisis integral sobre el uso, la disponibilidad, las consideraciones normativas, la legislación aplicable y las oportunidades que esta tecnología presenta en mercados nacionales e internacionales. Esta herramienta busca proporcionar soluciones innovadoras adaptadas tanto a pequeñas como a grandes empresas.

ÍNDICE

Introducción	03
Proceso de fermentación en sustrato sólido	04
Sustrato	05
Microorganismos	06
Biorreactores	06
Factores influyentes	10
Efecto de la temperatura	10
Efecto de la humedad	10
Selección del sustrato y los suplementos	11
Tamaño de las partículas del sustrato	11
Productos obtenidos y sus aplicaciones	12
Enzimas	12
Ácidos orgánicos	13
Biorremediación	13
Biosurfactantes	14
Biofertilizantes o biopesticidas	14
Aromas	15
Proteínas unicelulares	15
Hongos comestibles	16
Conclusión	17
Bibliografía	18

Introducción



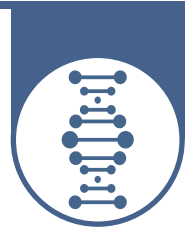
En las dos últimas décadas, los investigadores han definido la fermentación en estado sólido (FES) de distintas maneras, sin apartarse demasiado de los principios básicos fundamentales que definen el proceso de fermentación.

Además, a lo largo de los años se han utilizado en la literatura otros términos para referirse a este proceso de fermentación. Se incluyen los siguientes términos: (i) fermentación en sustrato sólido, (ii) bioprocesamiento en estado sólido, (iii) cultivo en sustrato sólido, (iv) digestión en estado sólido, (v) cultivo en estado sólido, (vi) fermentación en fase sólida, (vii) cultivo en estado sólido, (viii) cultivo en superficie y (iv) cultivo en superficie (Manan and Webb, 2017).

Desde el punto de vista tecnológico, la fermentación es la transformación de un sustrato orgánico por la acción metabólica de los microorganismos. El compuesto que se obtiene, intracelular o extracelular, se llama producto de fermentación. En toda fermentación ocurre una biotransformación del sustrato y siempre hay crecimiento microbiano, conversión de un sustrato en un producto de interés por la acción de las enzimas (Bermudez-Savón, 2014). Actualmente se continúa empleando la acción de microorganismos en esos y muchos otros procesos en la industria de alimentos. Además, en los últimos años, dado el auge de la biotecnología moderna, se han desarrollado procesos de fermentación que permiten obtener productos de alto valor que son usados como aditivos de la industria alimentaria (Parzanese, 2011).

Para la producción de metabolitos microbianos se utilizan dos tipos de fermentación: la fermentación sumergida y la fermentación en estado sólido (FES). La fermentación sumergida ofrece ventajas como la supervisión en línea y la automatización, mientras que en la FES los microorganismos se cultivan en su hábitat natural. La cantidad limitada de agua ofrece varias ventajas, como la fácil recuperación del producto, el bajo costo, la reducción de los procesos posteriores y la reducción de los requisitos energéticos (Perwez and Al Asheh, 2025).

Como resultado, se han realizado estudios sobre su viabilidad para ser aplicado en obtención de enzimas, biosurfactantes, biofertilizantes, ácidos orgánicos, hongos comestibles y otros compuestos de interés para la industria (Perwez and Al Asheh, 2025).

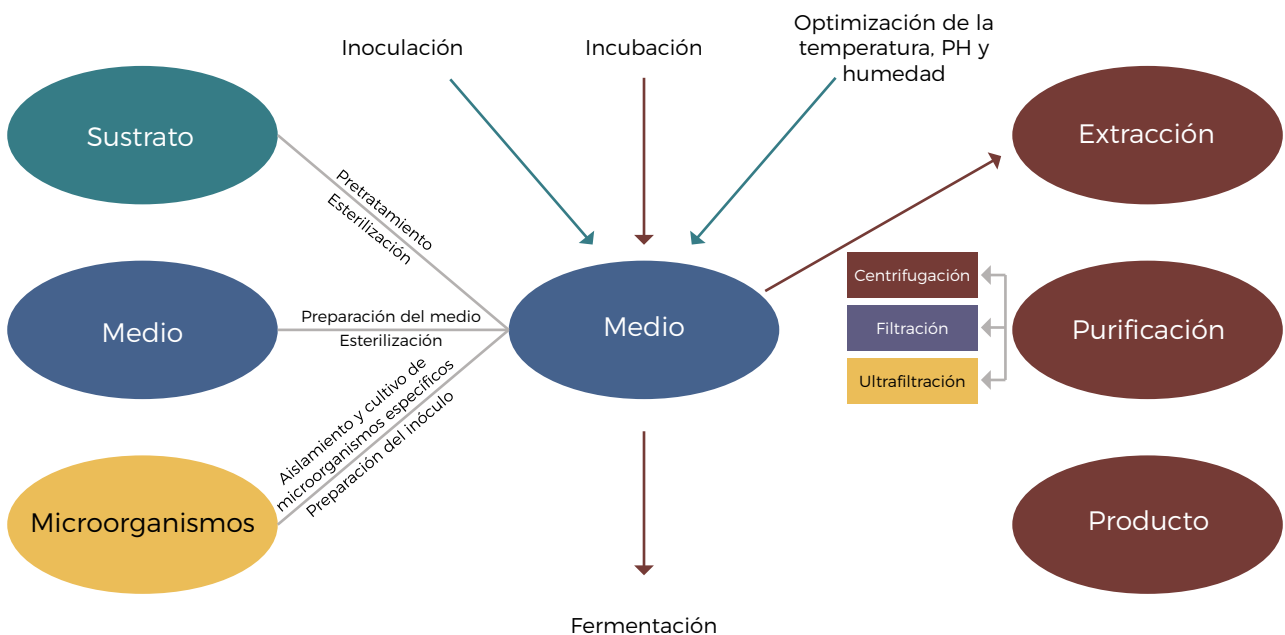


Proceso de fermentación en sustrato sólido

Se denomina FES a cualquier proceso fermentativo ejecutado sobre un medio no sumergido, en ausencia de agua libre, donde se usan sustratos naturales que sirven como fuente de nutrientes y son a su vez el soporte físico para los microorganismos. El bajo contenido de humedad define que solo un determinado grupo de microorganismos puedan desarrollarse, principalmente levaduras y hongos que tienen capacidad de crecer con menor disponibilidad de agua. La FES se produce en varias etapas:

1. Selección y la esterilización del sustrato, mediante procesos mecánicos, químicos o bioquímicos para que los nutrientes ligados estén disponibles para la hidrólisis y la fermentación.
2. Preparación del medio y del inóculo microbiano.
3. Incubación de los microorganismos en el sustrato, donde se controlan las diferentes condiciones (PH, temperatura, humedad).
4. Hidrólisis del sustrato pretratado.
5. Fermentación para obtener el metabolito microbiano deseado.
6. Extracción del producto: se realiza una purificación que consiste en la centrifugación, filtración y ultrafiltración del producto para obtener el producto final (Figura 1).

Figura 1. Procesos implicados en la valorización de residuos agroindustriales mediante fermentación en estado sólido.



Fuente: Perwez M, Al Asheh S (2025).

Sustrato

Para llevar a cabo un proceso de FES pueden utilizarse matrices biológicas, es decir, sustratos naturales, o soportes inertes, estos son sustratos sintéticos impregnados. La elección de uno u otro tipo de soporte dependerá de las particularidades del proceso y del tipo de producto que se quiere obtener.

Los residuos agroindustriales presentan características fisicoquímicas adecuadas para utilizarse como sustratos. En los últimos años, se han obtenido diferentes sustratos naturales que provienen de procesos agroindustriales y que mayormente son subproductos sin valor económico.

Además, la elección de los residuos agroindustriales para su uso también depende de su composición, ya que contienen azúcares, almidón, proteínas, contenido celulósico (35-50%), hemicelulósico (25-30%) o lignocelulósico (15-25%). Esto sugiere que la distinción en la composición del sustrato es fundamental para el éxito del proceso de fermentación (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química de diversos sustratos agroindustriales utilizados en la fermentación en estado sólido

Composición del sustrato	Sustrato
Lignocelulosa	Cáscara y paja de cebada, mazorca, cáscara y paja de arroz, cáscaras de soja, pulpa de remolacha azucarera, bagazo de caña de azúcar, salvado y paja de trigo, madera (aserrín).
Proteína	Canola, coco, semilla de algodón, mostaza, expeller de maní, bagazo de la semilla de palma, calabaza, harina de colza, sésamo, soja, girasol.
Azúcar soluble	Orujo de manzana y de uva, cáscara y pulpa de limón, orujo de kiwi, cáscara y pulpa de naranja, cáscaras de papaya, orujo de durazno, residuos de piña, vaina de algarroba, pulpa de café, pulpa de remolacha azucarera.
Almidón	Cáscara de banana, cebada, harina y pulpa de mandioca, harina de maíz, avena, arroz, salvado de arroz, residuos de batata, salvado de trigo, cáscaras de batata.

Fuente: Yafetto, L. 2022.

En general tienen un alto contenido de almidón y polisacáridos de glucosa, esto es de suma importancia para que actúen como fuente de carbono para el crecimiento de los microorganismos. Sin embargo, la presencia de lignina limita la disponibilidad y el aprovechamiento de las fuentes de carbono por parte de algunos organismos. Para superar este obstáculo una alternativa es disminuir el tamaño de partícula del sustrato sólido, de esa forma se aumenta el área superficial disponible para los microorganismos, facilitando los procesos de degradación mediante el metabolismo enzimático y aumentando, por lo

tanto, la disponibilidad de las fuentes de carbono. Cuando el sustrato carece de alguno de los nutrientes necesarios se realiza una suplementación incorporando una fuente externa. Esta biomasa lignocelulósica se hidroliza posteriormente mediante diferentes tipos de enzimas producidas por diversos microorganismos.

APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS DE LA AGROINDUSTRIA

La fermentación en estado sólido es un excelente bioproceso para producir metabolitos secundarios a partir de residuos agroindustriales. Los residuos agroindustriales, también llamados subproductos, se producen en grandes volúmenes cada año, lo que genera serias preocupaciones sobre su eliminación (Perwez and Al Asheh ,2025).

Según Bharathiraja et al. (2017), se estima que en todo el mundo se generan anualmente 5000 millones de toneladas métricas de residuos agrícolas procedentes de torta de maní, salvado y paja de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de frutas y verduras, salvado de trigo, entre otros. Una parte de estos residuos se utilizan como pienso para los animales de granja o ganadería. Los residuos restantes suelen verterse, quemarse o enterrarse en las explotaciones agrícolas o en las industrias de procesamiento de alimentos (Adu et al., 2018).

Su valorización es necesaria para la reducción de las pérdidas de alimentos en pos de lograr una mayor eficiencia productiva. En consecuencia, en los últimos años el proceso de FES ha recibido una creciente atención por parte de investigadores de todo el mundo por ser un método ecológico, económico y viable para la gestión de residuos (Perwez and Al Asheh, 2025). Además, se encuentran en abundancia, son fáciles de recoger de las explotaciones agrícolas o de la industria y fáciles de preparar para el uso previsto (Yafetto, 2022).

Para la elección de un residuo o subproducto agroindustrial como sustrato se deben tener en cuenta las siguientes características:

- › Costo del material, disponibilidad y calidad uniforme del residuo todo el año.
- › Posibilidad de almacenamiento y conservación del residuo sin que este sufra procesos de deterioro que imposibiliten su uso como sustrato en el proceso fermentativo.
- › Composición química y estructura macromolecular que facilite la disponibilidad de nutrientes.
- › Tamaño y forma de partícula adecuados para el aprovechamiento de las fuentes de carbono y otros nutrientes que son necesarios para el crecimiento y proceso de fermentación.

Microorganismos

Desde el punto de vista biotecnológico la fermentación es la transformación de un sustrato orgánico por la acción metabólica de los cultivos microbiológicos, ya sean bacterias, hongos o levaduras.

Los microorganismos más utilizados son principalmente los hongos filamentosos de los géneros *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Rhizopus* y *Trichoderma*. Específicamente, este tipo de hongos presentan ciertas características como el crecimiento en forma de micelio, la tolerancia a bajas actividades de agua y condiciones de alta tensión osmótica, lo que los hace ideales para el desarrollo en un medio que carece de agua libre (Yazid et al., 2017).

Particularmente, determinadas especies del género *Aspergillus* son las más extensamente usadas en este tipo de procesos. Esta elección se debe a que tienen la capacidad de crecer rápidamente y producir una gran cantidad de enzimas, debido a que crecen en forma de micelios o filamentos que les facilita la separación y extracción del producto. Además, las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces boulardii*, *Candida sp*) y especies de actinobacterias (*Streptomyces thermonitrificans*, *Streptomyces chattanoogensis*) son empleados en la FES (Orozco et al., 2008; Munishamanna et al., 2017).

La elección de microorganismos para un proceso de fermentación eficaz depende de varios factores como el comportamiento de crecimiento del microorganismo, el rendimiento específico del producto, la capacidad de descomponer un sustrato concreto, la buena tolerancia a la temperatura y el pH, la susceptibilidad a la manipulación genética y la seguridad del producto fermentado para el consumo humano y animal (Upadhyaya et al., 2016).

Biorreactores

Actualmente existen varios tipos de biorreactores destinados a procesos de FES. Cada uno de ellos presenta características determinadas que lo hace adecuado para ciertos fines pero que lo limita para otros. Esto significa que dependiendo del tipo de proceso se deben ajustar las condiciones y el diseño del biorreactor, a fin de que sea más eficiente. Los biorreactores se han clasificado en cuatro categorías en función de su modo de funcionamiento (Arora et al., 2018). A continuación, se describe cada uno:

I. Biorreactor de bandejas

Las bandejas suelen ser de madera, metal o plástico, con o sin perforaciones, empaquetadas con sustrato-soporte y apiladas unas sobre otras en salas de temperatura y humedad controladas. Permite generar escala, aumentando la superficie y/o

incrementando el número de bandejas. La mayoría de las veces, el sustrato requiere una esterilización por separado.

Este tipo de biorreactor se ha utilizado tradicionalmente, en algunos países asiáticos, para la producción de alimentos fermentados como tempeh, miso, koji y salsa de soja.

Una proporción importante de los procesos de SSF en la industria se realizan bajo este tipo; aunque no está exento de desventajas. Una de ellas, es la transferencia de calor que se produce principalmente por conducción y, debido a la baja conductividad térmica del sustrato, la disipación de calor no suele ser eficiente, lo que impone limitaciones en la altura de la cama. Además, requiere de una superficie operativa elevada y de mucha mano de obra.

II. Biorreactor de lecho estático o fijo

El biorreactor de lecho fijo con aireación forzada es un equipo semicontinuo, que se caracteriza por funcionar continuamente con respecto al flujo de gas y discontinuo en relación al lecho fijo de partículas sólidas.

Ello ayuda a la reposición de O₂ y humedad, y mitiga la acumulación de calor y CO₂. Se emplean generalmente cuando la mezcla es indeseable o perjudicial para el crecimiento microbiano.

La construcción consiste en un tubo/tambor cilíndrico de vidrio o metal, que aloja el sustrato y las paredes del cilindro o tambor pueden estar encamisadas. Dentro del lecho también puede haber placas de refrigeración para facilitar una transferencia de calor eficaz.

Este tipo facilita una mayor carga del sustrato, permite mayores velocidades de carga y presenta un mayor control de las variables del proceso comparado con el biorreactor por bandejas.

Sin embargo, presenta problemas de acumulación de calor, compactación del sustrato, canalización del aire, secado del lecho y heterogeneidad del proceso, lo que impone algunas limitaciones en las alturas del lecho.

III. Biorreactor de pulsación de presión de aire

Estos biorreactores emplean la pulsación periódica de la presión del aire, que puede combinarse con circulación forzada de aire para mejorar la actividad microbiana y mitigar la heterogeneidad del proceso. Los sistemas que incluyen tanto la pulsación como la circulación forzada de aire se denominan FES doblemente dinámicos con gas.

Informes recientes sugieren que este tipo de biorreactor supone una notable mejora respecto al de bandejas. Sin embargo, hay poca evidencia en modelización de transferencia de calor y masa que podrían responder sobre qué alturas máximas de lecho son posibles dados los parámetros cinéticos y de transporte.

IV. Biorreactores de mezcla intermitente o continua

Estos biorreactores presentan agitación suave y aireación forzada para mejorar la transferencia de calor y de masa y el crecimiento microbiano. La mezcla mejora el transporte convectivo, ya que aumenta la superficie del sustrato expuesto al aire húmedo y/o al fluido refrigerante. El biorreactor consta de un recipiente en forma de tambor giratorio y, por lo general, consta de tres subsistemas: la pared del tambor, el espacio del techo y el sustrato. El aire sopla a través del espacio de arriba por encima del lecho de partículas del sustrato y el biorreactor puede girar de forma intermitente o continua. El espacio útil para la fermentación suele ser el 30% del volumen total del tambor.

Factores influyentes



Los factores que influyen en la FES para la obtención de productos con valor agregado son la temperatura, el pH, la humedad, la selección del sustrato y los suplementos, el tamaño de las partículas del sustrato y el tamaño del inóculo (Perwez & Asheh, 2025).

Efecto de la temperatura

La temperatura es un factor importante que rige el crecimiento microbiano en el biorreactor. Cada microorganismo crece en un rango de temperatura determinada, produciendo metabolitos secundarios y enzimas. Inicialmente, el crecimiento de los microorganismos no produce calor debido a la baja concentración de biomasa. Sin embargo, a medida que aumenta el crecimiento de los mismos, aumenta la concentración de biomasa, lo que incrementa la actividad metabólica de los microorganismos, generando un aumento de la temperatura. La aireación es necesaria para eliminar el aire caliente de la ventilación.

Efecto del pH

El pH afecta a la tasa de crecimiento de los microorganismos en el medio sólido. El cambio en el pH se debe a la liberación de ácidos orgánicos como el ácido cítrico, láctico y acético, lo que resulta en una disminución del pH; mientras que la asimilación de ácido orgánico hace que el pH aumente. Por consiguiente, el pH de la FES debe ajustarse y controlarse cuando sea necesario. El uso de urea en lugar de amoníaco puede servir para controlar el pH.

Los microorganismos tienen diferentes rangos de pH necesarios para su crecimiento; por ejemplo, las bacterias crecen especialmente en pH neutro, los hongos filamentosos crecen en un rango de pH de 2 a 9 y a un pH óptimo de 3,8 a 6 y las levaduras crecen en un amplio rango de pH de 2,5 a 8,5 y a un pH óptimo de 4 a 5.

Efecto de la humedad

El contenido de humedad del sustrato es esencial para el crecimiento de los microbios durante el proceso. Un menor contenido de humedad reduce la solubilidad del sustrato y de los nutrientes, mientras que la aglomeración de partículas se produce a mayor contenido de humedad, lo que dificulta la transferencia de oxígeno. En general, los hongos y las levaduras requieren menos contenido de agua que las bacterias. El contenido de humedad del sustrato varía entre el 30 y el 80%; las bacterias necesitan aproximadamente un 70%, mientras que las levaduras y los hongos necesitan entre un 20 y un 70%.

Selección del sustrato y los suplementos

El pretratamiento del sustrato sólido es un requisito esencial para que esté disponible para el crecimiento microbiano en el medio. El pretratamiento incluye hidrólisis física, química y enzimática para mejorar los nutrientes. Por ejemplo, para utilizar eficientemente los materiales lignocelulósicos, se aplicaron a la lignina tres métodos de pretratamiento: físico, químico y combinado, para evaluar su impacto en la biomasa (paja, algarroba y cáscara de nuez) por *Aspergillus fumigatus* G-13.

La selección del sustrato puede reducir el costo global. Esto implica una selección adecuada de residuos agrícolas e industriales. La composición y las propiedades de los suplementos también afectan a la productividad.

Tamaño de las partículas del sustrato

El tamaño de las partículas del sustrato es esencial para el crecimiento adecuado de los microorganismos. La relación entre la superficie y el volumen de las partículas define la fracción de sustrato y depende de la concentración de envase del microorganismo. El tamaño del sustrato crea un espacio vacío y el aire contenido afecta al crecimiento.

Un tamaño reducido del sustrato conduce a su acumulación, lo que inhibe la aireación de los microorganismos. Partículas más grandes y en mayor número, mejoran la ventilación y el intercambio de gases, pero proporcionan un área menor para la acción microbiana.

Tamaño del inóculo

Se requiere un tamaño de inóculo adecuado para que crezcan los microbios y sintetizen los metabolitos secundarios. Un tamaño de inóculo más pequeño conduce a un menor número de células en el medio de producción, lo que requiere más tiempo para alcanzar el recuento celular óptimo necesario para utilizar eficientemente el sustrato y generar el producto deseado. Mientras que a medida que el tamaño del inóculo excede un límite, conduce a una limitación en la transferencia de masa y a un metabolismo reducido.

Productos obtenidos y sus aplicaciones



Se han evidenciado procesos exitosos en la producción de bioproductos como enzimas hidrolíticas y ácidos orgánicos; y en menor medida, hongos comestibles, alimento para animales, biocombustibles, bioetanol, aromas y otros metabolitos secundarios (Yafetto, 2022; Perwez & Asheh, 2025).

Enzimas

Las enzimas son biocatalizadores muy eficientes empleados en muchos procesos industriales porque tienen una especificidad única para los sustratos, la capacidad de acelerar reacciones y no son tóxicas. La producción de enzimas es una de las aplicaciones más exitosas de la FES. En décadas anteriores, se han utilizado un gran número de microorganismos para producir enzimas, lo que ha aumentado la variedad y cantidad que se producen con fines comerciales e industriales (Yafetto, L 2022; Perwez & Asheh, 2025). Las enzimas se destinan a la industria de alimentos y bebidas, de detergentes, de biocombustibles, cosmética, textil y farmacéutica (Mejias et al., 2018). En la tabla 2 se presentan las principales enzimas obtenidas comercialmente por procesos de FES.

Tabla 2. Enzimas producidas a partir de FES con residuos agroindustriales mediante biotecnología microbiana.

Enzima	Microorganismo	Sustrato
α -amilasa	<i>Aspergillus oryzae</i> <i>Aspergillus niger</i> <i>Penicillium chrysogenum</i>	Hoja de mazorca, torta de aceite de coco, residuos de la molienda de harina, torta de aceite de maní, salvado de arroz, paja de centeno, cáscara y harina de soja, salvado de trigo y residuos de gluten de trigo.
α -amilasa, β -amilasa	<i>Aeromonas caviae</i> <i>Anoxybacillus amylolyticus</i> <i>Bacillus subtilis</i>	Residuos de banana, bagazo de batata, torta de coco, salvado y harina de maíz, cáscara de papa, salvado y cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos de té, salvado de trigo.
α -Galactosidasa	<i>Aspergillus niger</i>	Salvado de arroz, cáscara de arroz, pulido de arroz, salvado de trigo.
Celulosa	<i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Penicillium citrinum</i> <i>Trichoderma koningii</i> <i>Trichoderma reesei</i>	Tronco de palma aceitera, residuos de vinagre, salvado de trigo.
Glucoamilasa	<i>Aspergillus awamori</i> <i>Aspergillus sp.</i> <i>Fusarium solani</i>	Salvado de maíz, copos y salvado de arroz, salvado de trigo.
Inulinasa	<i>Penicillium oxalicum</i>	Orujo de zanahoria.

Lipasa	<i>Aspergillus flavus</i> <i>Aspergillus niger</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Trichoderma harzianum</i>	Salvado de arroz, salvado de trigo.
Pectinasa	<i>Moniliella</i> <i>Penicillium sp.</i> <i>Penicillium viridicatum</i>	Bagazo de naranja, de mango, de azúcar, salvado de trigo, cáscaras de banana.
Proteasa	<i>Aspergillus awamori</i>	Salvado de trigo.
Lacasa	<i>Rheinheimera sp.</i>	Cáscaras de frutas cítricas.
Pectinasa	<i>Bacillus cereus</i>	Bagazo de naranja y de caña de azúcar, salvado de arroz, salvado de trigo.

Fuente: Yafetto, L 2022

La mayor producción de ácidos orgánicos se realiza por síntesis química, aunque también pueden obtenerse por biosíntesis ya que algunos microorganismos sintetizan ácidos orgánicos como metabolitos secundarios durante su ciclo de vida. Los ácidos orgánicos producidos biológicamente se consideran seguros, rentables y fáciles de producir. Al igual que las enzimas, los ácidos orgánicos se aplican principalmente en la industria de alimentos y bebidas, médica, farmacéutica y cosmética (Yafetto, L 2022).

Algunos de los ácidos orgánicos producidos, con residuos agroindustriales a través de la FES, son ácido butírico, acético, cítrico, elágico, fumárico, gálico, glucónico, láctico, oxálico, succínico, entre otros (Yafetto, L 2022; Pervez & Asheh, 2025).

El ácido cítrico y el ácido láctico son los ácidos orgánicos industriales más utilizados comercialmente. El *Aspergillus niger* es el hongo más utilizado en la producción de ácido cítrico y los residuos agroindustriales son los obtenidos de frutas como el orujo de manzana, orujo de uva, la cáscara de naranja, cáscara de banana, residuos de pulpa de piña y residuos de frutas mixtas. El ácido láctico es un conservante y agente acidificante utilizado en la industria alimentaria y las bacterias más utilizadas para su producción son *Lactobacillus amylophilus*, *L. Delbrueckii*, *L. casei* y *L. plantarum* (Yafetto, L 2022).

Biorremediación

La biorremediación es un proceso que utiliza organismos vivos, como microorganismos, hongos o plantas, para limpiar suelos, aguas subterráneas o aguas superficiales.

La FES utiliza microorganismos cultivados en sustratos sólidos para eliminar contaminantes en ausencia o casi ausencia de agua que fluya libremente. Debido a su versatilidad en el manejo de diferentes tipos de contaminantes, así como a su promesa de soluciones eficientes y asequibles, esta técnica ha despertado interés.

Es muy útil para limpiar los sedimentos contaminados del suelo y algunos tipos de residuos industriales. Una de las ventajas es que a menudo puede realizarse *in situ*, lo que reduce al mínimo la necesidad de transportar y manipular materiales peligrosos. Sin embargo, elegir los microbios adecuados, mantener las condiciones ideales para el crecimiento y la actividad microbiana y conservar el sustrato son aspectos cruciales para la eficacia del proceso (Perwez & Asheh, 2025).

Biosurfactantes

Los surfactantes naturales se denominan biosurfactantes y poseen moléculas anfifílicas con fracciones hidrofílicas e hidrofóbicas. Estas propiedades les proporcionan superficie reducida y tensión interfacial formando emulsión, por lo que se utilizan para la emulsificación, la detergencia, la lubricación y la formación de espuma. Los biosurfactantes se emplean en la industria de cosméticos, lavandería y también en la industria médica como agente antimicrobiano, antitumoral y antiinflamatorio. La Food and Drug Administration (FDA) ha aprobado la producción del biosurfactante utilizando levaduras y le ha otorgado el estatus de seguro (Cedra et al., 2019; Perwez & Asheh, 2025).

Los biosurfactantes pueden dividirse en muchos grupos en función de la estructura y la fuente: entre ellos figuran los glicolípidos, los lípidos naturales, los lipopéptidos, los fosfolípidos y los surfactantes poliméricos (Cedra et al., 2019). Un estudio generó cepas de *Lactobacillus* y *Bacillus* producido por la industria de la molienda húmeda de maíz, formando un medio fermentado para producir biosurfactantes lipopéptidos y fosfolípidos que pueden ser utilizados en la industria cosmética y de cuidado personal (Vecino et al., 2023).

Biofertilizantes o biopesticidas

La producción de biofertilizantes y biopesticidas mediante FES es un método ecológico de producir fertilizantes de alta calidad utilizando actividades microbianas en sustratos sólidos. Los microorganismos pueden producir toxinas para competir o eliminar a los insectos o plagas. Por ejemplo, se realizó la FES a partir de residuos agroindustriales de estiércol de ganado, residuos de la producción de vinagre y paja de arroz utilizando *Trichoderma harzianum* para la producción de fertilizante bioorgánico con el fin de controlar la marchitez por fusarium del pepino (Cedra et al., 2019).

Aromas

En la industria, los aromas se emplean como aditivos que mejoran las características organolépticas de los productos finales, por lo cual su uso es extensivo en industrias como la alimentaria, cosmética, química y farmacéutica. Varios estudios han evaluado la FES para la bioproducción de diferentes compuestos aromáticos partiendo de residuos agroindustriales de diverso origen, como aromas frutales, vainillina, lactonas con aroma de coco o durazno y aroma a rosas. Sin embargo, la comprensión del proceso ha sido limitada a estudios en escala laboratorio en los que el enfoque ha sido la viabilidad inicial, en vez del análisis detallado del proceso productivo.

Uno de los subproductos agroindustriales con mayor producción del mundo es el bagazo de caña de azúcar, un residuo fibroso obtenido después de la extracción de jugo, que utilizando la FES se puede obtener compuestos con aroma a frutas, empleando la levadura *Kluyveromyces marxianus* a nivel laboratorio (Martínez-Avila et al., 2019).

Proteínas unicelulares

Las proteínas unicelulares (SCP), también denominadas bioproteína, proteína microbiana o biomasa proteica; se obtienen de diversos microorganismos, entre ellos hongos, bacterias, levaduras y algas, en forma pura o mixta.

La producción de SCP es independiente del clima o las estaciones, pero requiere un medio de crecimiento bajo condiciones controladas, como temperatura, oxígeno, luz y mezcla continua.

Las SCP se pueden obtener de un amplio número de microorganismos, pero son limitados cuando se destinan al consumo humano. La selección de la especie más apropiada está influenciada por su rendimiento, tasa de crecimiento, sustrato y condiciones óptimas de crecimiento, como temperatura, pH y requerimientos nutricionales.

La producción de SCP para el uso de residuos agroindustriales mediante FES se ha convertido en un medio importante e innovador para aumentar el déficit de proteínas asociado a las plantas ya que los residuos alimentarios son fuente de carbohidratos, lípidos, proteínas, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos. Se han encontrado estudios que utilizaron como sustrato cáscaras de piña, manzana, cítricos, banana, batata, pulpa de zanahoria y remolacha (Salazar-López et al. , 2022).

Hongos comestibles

La FES permite producir, por vía biotecnológica y de forma combinada, hongos comestibles *Pleurotus spp.* y forraje beneficiado; por lo que es la única tecnología que permite obtener, mediante la bioconversión de subproductos agrícolas, alimento humano y alimento animal. Durante la FES los hongos generan una cantidad significativa de enzimas que degradan los residuos lignocelulósicos. De esa manera, dado que la lignina presente originalmente fue degradada, esos residuos pueden ser destinados a la elaboración de piensos para nutrición animal (Bermúdez-Savón et al., 2014).

Pleurotus spp. es un hongo con múltiples propiedades gastronómicas, medicinales y nutricionales, pero su cultivo no está muy difundido. Un estudio encontró que la producción de *Pleurotus spp.* por FES es todavía incipiente, ya que la máxima capacidad de bioceldas empleadas es 3 kg, por lo que todavía resta incursionar en técnicas que permitan escalar la producción. Los sustratos que se utilizan para el cultivo de hongos son: paja de cebada, paja de arroz, pulpa de café, paja de trigo, cáscara de semilla de girasol, residuos de uva, cáscaras de papa, aceite de semilla de girasol, rastrojos de maíz, y de calabaza, bagazo de caña de azúcar, harina de cebada, harina de trigo, harina de arroz, harina de maíz, harina de soja, salvado de trigo, harina de trigo integral, harina de maíz (Duarte Trujillo et al., 2018).

Conclusión



La obtención de bioproductos mediante FES es un tema en constante evolución. La mayoría de los estudios reportados destacan el uso de residuos agroindustriales como sustrato para su posterior valorización por lo que contribuye a la reducción de las pérdidas de alimentos y aporta beneficios económicos.

La procedencia de las investigaciones sobre FES provienen principalmente de China, India y Brasil, lo que sugiere un inmenso interés por parte de los investigadores en procesar los residuos agroindustriales para convertirlos en productos domésticos e industriales útiles. A pesar de su utilidad, es necesario ir más allá y explorar los diferentes retos que presenta este tipo de fermentación. Claramente, el desarrollo de biorreactores es una de las principales cuestiones que se deben seguir estudiando (Yafetto, L 2022).

Asimismo, la mayor parte de las investigaciones publicadas se centran en el desarrollo de procesos a pequeña escala. Sin embargo, los principales retos a superar en la FES están relacionados con el desarrollo a nivel industrial (Cerdeira et. al, 2019).

Bibliografía



- › Adu S.K., Yafetto L., et al. (2018). Biotechnological potential of agro-industrial wastes for protein enrichment by solid-state fermentation using *Aspergillus niger*. *Stud. Fungi.*;3(1):176-186.
- › Arora, S., Rani, R., Ghosh, S. (2018). Biorreactores en tecnología de fermentación en estado sólido: diseño, aplicaciones y aspectos de ingeniería. *J. Biotech.*;269:16-34. doi: 10.1016/j.jbiotec.2018.01.010.
- › Bermúdez-Savón, R. C., García-Oduardo, N., Serrano-Alberni, M., Rodríguez-Castro, M. I., & Mustelier-Valenzuela, I. (2014). Conversión de residuales agroindustriales en productos de valor agregado por fermentación en estado sólido. *Tecnología Química*, XXXIV(3), 217-225.
- › Cerda A., Artola A., Barrena R., Font X., Gea T., Sánchez A. (2019). Innovative Production of Bioproducts From Organic Waste Through Solid-State Fermentation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. Volume 3 - 2019. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00063>
- › Duarte Trujillo A.S., Pineda Insuasti J.A., Claudia Patricia Soto Arroyave C.P., Pineda Soto C.A. (2019). Producción de la seta rosada (*Pleurotus djamor*). *Revista Biorrefinería* Vol. 2 N°. 2
- › Manan M.A., Webb C. (2017). Modern microbial solid state fermentation technology for future biorefineries for the production of added-value products. *Biofuel Res. J.* 16:730-740.
- › Martínez-Avila, O., Sánchez, A., Font, X., Barrena, R. (2019). Solid-state fermentation as an alternative for valorizing agroindustrial residues: Fruit-like aroma production from sugarcane bagasse. *Revista ITTPA*, 1(1), 05-11.
- › Mejias, L., Cerda, A., Barrena, R., Gea, T., Sanchez, A., (2018). Microbial strategies for cellulase and xylanase production through solid-state fermentation of digestate from biowaste. *Sustainability* 10, 2433.
- › Munishamanna K.B., Suresha K.B., Veena R., Subramanya S. (2017). Solid state fermentation of mango peel and mango seed waste by different yeasts and bacteria for nutritional improvement. *Int. J. Food Ferment. Technol.* 7(1):111.
- › Orozco A.L., Pérez M.I., et al. (2008). Biotechnological enhancement of coffee pulp residues by solid-state fermentation with *Streptomyces*. Py-GC/MS analysis. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 81(2):247-252.

- › Perwez, M., & Al Asheh, S. (2025). Valorization of agro-industrial waste through solid-state fermentation: Mini review, *Biotechnology Reports*, Volume 45.
<https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00873>.
- › Salazar-López, N. J., Barco-Mendoza, G. A., et al. (2022). Single-Cell Protein Production as a Strategy to Reincorporate Food Waste and Agro By-Products Back into the Processing Chain. *Bioengineering* (Basel, Switzerland), 9(11), 623.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering9110623>
- › Upadhyaya S., Tiwari S., Arora N.K., Singh D.P. (2006). In: *Microbes & Environmental Management*. Singh J.S., Singh D.P., editors. Studium Press; USA: 2016. Microbial protein: a valuable component for future food security; pp. 259-279.
- › Vecino X., Moldes A.B., Martínez-Arcos A., Cid-Pérez B., López-Prieto A., Cruz J.M. (2023). Chapter 7 - Biosurfactants produced from Corn Steep Liquor and Other Nonconventional sources: Their application in Different Industries. In: Soberón-Chávez G, editor. *Biosurfactants*: Academic Press. p. 129-53.
- › Yafetto L. (2022). Application of solid-state fermentation by microbial biotechnology for bioprocessing of agro-industrial wastes from 1970 to 2020: A review and bibliometric analysis. *Heliyon*, 8(3), e09173. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09173>
- › Yazid N.A., Barrena R., Komilis D., Sánchez A. (2017). Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: a review. *Sustainability*.9(2):1-28



**Ministerio
de Economía**
República Argentina

**Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca**