

# Más bioetanol, menos residuos: el papel de los soportes sólidos en la reutilización de levaduras

Daniela J. Cruz-Avilés <sup>1,\*</sup>, Pedro E. Lázaro-Mixteco <sup>2</sup>, Agustín J. Castro-Montoya <sup>1</sup>, Ana A. Vargas-Tah <sup>2</sup>

<sup>1</sup> División de Estudios de Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

\* Autor de correspondencia: [1208797h@umich.mx](mailto:1208797h@umich.mx)

## Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de junio de 2025    Aceptado: 19 de julio de 2025    Publicado: 5 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.476>

**Resumen:** En los procesos de fermentación para producir bioetanol, se utilizan levaduras como biocatalizadores para convertir azúcares en etanol. La recuperación y reutilización de estos microorganismos es clave para mejorar la eficiencia y reducir costos. Una estrategia eficaz es la inmovilización celular sobre soportes sólidos, que permite reutilizar las células, aumentar la densidad celular y simplificar el proceso. Al emplear estos soportes, es posible eliminar etapas de separación, reducir el tamaño del equipo de fermentación y disminuir el impacto ambiental. Este artículo describe las características ideales que debe tener un soporte, compara distintos materiales —incluidos residuos agroindustriales— y muestra cómo influyen en la productividad del proceso de fermentación.

**Palabras clave:** soporte, inmovilización, fermentación, bioetanol, biocatalizadores.

## Introducción

La fermentación alcohólica es una biorreacción que permite degradar azúcares en alcohol (y dióxido de carbono), y es crucial para la producción industrial de etanol, que se utiliza en la elaboración de bebidas alcohólicas y como combustible. Diversos microorganismos, como las bacterias y levaduras, son capaces de realizar la fermentación alcohólica. Usualmente, la producción de etanol se lleva a cabo en cultivos líquidos con células en suspensión; sin embargo, desde hace varios años, existe el interés por diseñar nuevas tecnologías para la fermentación, en donde las células se encuentren adheridas en soportes, con el objetivo de optimizar el proceso fermentativo. El proceso en el cual se fijan o adhieren células a un material comúnmente conocido como “soporte”, o bien son atrapadas o encapsuladas es conocido como “inmovilización celular”. El objetivo de este proceso es mantener la actividad celular, limitar su movimiento y facilitar su reutilización.

Una matriz soporte, o bien, un “soporte” es un material que sirve como una base que cumple con ciertas características físicas, químicas y mecánicas deseables para que exista fijación o adhesión de algún compuesto químico o biológico. El hecho de que las células se encuentren en un material soporte les brinda propiedades diferentes a las células libres, como una mejor estabilidad al esfuerzo cortante. Además, al emplear células inmovilizadas en un soporte, este último ayuda a tener una mayor concentración de estas mismas en un menor volumen, lo que incide en un menor tamaño del equipo de fermentación. La producción de bioetanol vía fermentación microbiana para diferentes fines como la generación de energía, la implementación como materia prima para productos de mayor valor agregado, la industria farmacéutica, entre otros, nos lleva a buscar procesos que tengan una mayor eficiencia global, lo que incide en un menor costo total del bioproceso y un menor impacto ambiental.

## Desarrollo

### *Fermentación microbiana*

La producción de bioetanol se puede llevar a cabo mediante la fermentación microbiana de azúcares provenientes de jugos o de hidrólisis de biomásas, empleando levaduras o bacterias como biocatalizadores para la conversión de azúcares a etanol. Cabe resaltar que un proceso fermentativo común, las células no se recuperan con facilidad; además de que es requerida una etapa de separación posterior a la fermentación para remover las células de levadura del líquido fermentado como se muestra en la Figura 1. Así, al ser requerida una operación unitaria de separación, el proceso global tiene un mayor consumo de energía.

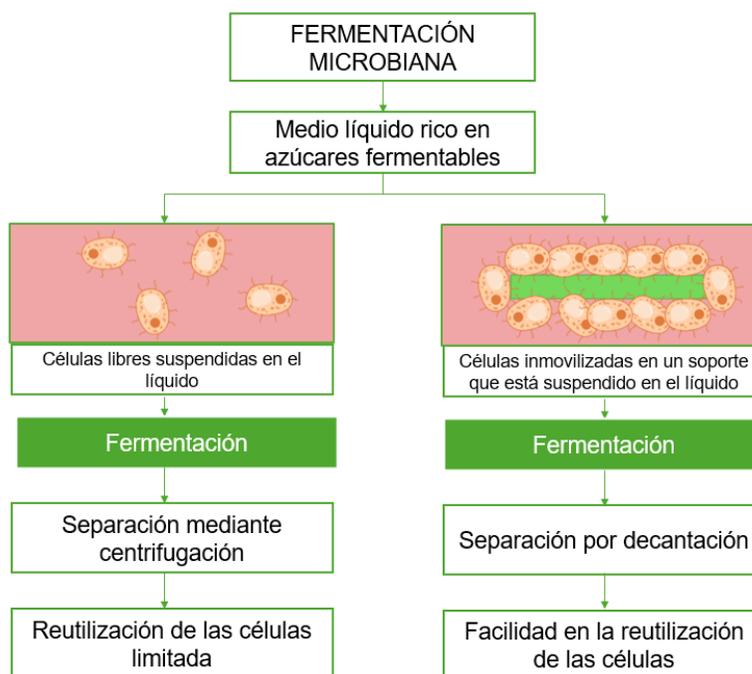


Figura 1. Proceso de fermentación microbiana con células libres y células inmobilizadas.

Al emplear una matriz soporte de base en la que las células que son responsables de la fermentación estén fijas o adsorbidas, el sistema conformado por las células y el soporte se puede recuperar y reutilizar en varios lotes de fermentación, aunado a que, dependiendo de las condiciones de operación, se puede lograr evitar una etapa de separación, logrando minimizar tiempos, equipos y materia prima, haciendo así un bioproceso global más rentable y de menor impacto ambiental.

#### *Soportes para inmovilización celular*

Por su naturaleza las células tienden a adherirse a superficies sólidas, sin embargo, pueden existir distintas fuerzas que hacen que se adhieran a un soporte, fuerzas débiles como son las fuerzas electrostáticas y las fuerzas de Vander Waals; o fuerzas más fuertes como son los enlaces covalentes. Cuando se requiere reutilizar un soporte sólido se buscan fuerzas débiles entre el soporte y las células, acorde a Eş *et al.*, (2015) esto trae consigo algunas desventajas como la posible pérdida de las biomoléculas, una menor estabilidad y la posibilidad de que exista desorción del biocatalizador. Por ello se han estudiado diferentes soportes que logren minimizar estos efectos adversos.

Un material soporte apto para la inmovilización celular debe poseer ciertas características para que se vea favorecida tanto la adsorción como la productividad, Kourkoutas *et al.*, (2004), Eş I. *et al.*, (2015) y Rodríguez-Restrepo y Orrego (2020) señalan que las características más importantes para un soporte son:

- **Amplia área superficial:** La inmovilización celular sobre un soporte sólido genera una capa única de células adheridas al material, como se muestra en la Figura 2. Por esta razón, se prefieren soportes con estructura porosa, ya que ofrecen una mayor superficie disponible. Esto permite concentrar una mayor cantidad de células en un espacio reducido en comparación con sistemas donde las células permanecen libres. Además, los poros facilitan tanto la entrada de azúcares, que sirven como fuente de energía para las células, como la salida del etanol producido durante la fermentación hacia el medio líquido.
- **Estabilidad mecánica:** el soporte debe tolerar las condiciones de operación del reactor, como puede ser agitación, cambios de presión, entre otros, sin degradarse o cambiar su forma.
- **Estabilidad química:** el soporte no debe ser soluble, ni ser degradado por solventes, además de ser resistente a cambios de pH.
- **Estabilidad térmica:** tolerancia a las condiciones de operación del reactor, y de la autoclave para su esterilización.

- Estabilidad biológica: que cuente con resistencia a la degradación microbiana.
- Estructura: las estructuras rugosas y porosas son más favorecidas para la adhesión de las células que las estructuras homogéneas y lisas acorde a Genisheva *et al.*, (2011).
- No debe ser tóxico: no debe causar la muerte celular de las levaduras al contacto prolongado con ellas.
- Facilidad de separación: que pueda separarse por operaciones como decantación o filtración, disminuyendo así costos energéticos como sería el uso de una centrifuga.
- Reutilizable: debido a que con el paso del tiempo se va perdiendo viabilidad celular, esto quiere decir que muchas células mueren o ya no cumplen con las mismas funciones para transformar azúcares a etanol, por lo cual deben ser removidas del material soporte para después inmovilizar o fijar un nuevo lote de células viables.
- Rentable y escalable: el costo del material soporte y su escalabilidad inciden en su aplicación a nivel industrial.

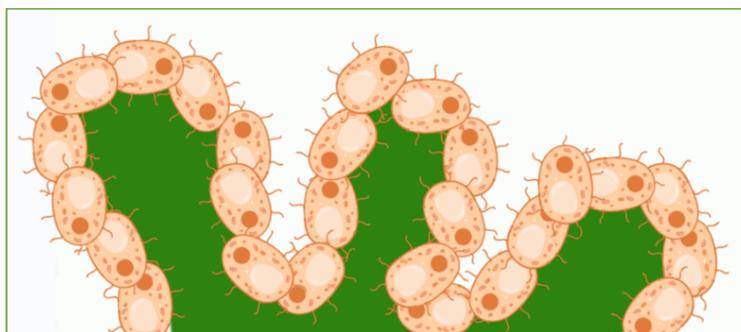


Figura 2. Adsorción de células de levadura en un soporte sólido.

Moreno *et al.*, (2018) clasifican a los soportes en soportes naturales, soportes orgánicos, soportes inorgánicos, membranas y agentes multifuncionales. Como soportes naturales se pueden considerar los residuos agrícolas, forestales (lignocelulósicos) o residuos de frutas; dentro de los soportes orgánicos podemos encontrar al quitosano, a la carragenina y al alginato; como soportes inorgánicos encontramos ciertos materiales cerámicos o vidrio poroso, por mencionar algunos ejemplos de estos. En la Tabla 1 se muestra una comparación de parámetros obtenidos de distintos soportes estudiados para la producción de etanol, como concentración de células inmovilizadas que es la cantidad de biomasa adsorbida (células fijas) por gramo de material soporte, la conversión en gramos de etanol obtenido sobre los gramos de sustrato (azúcares) alimentados y la productividad que es la cantidad de etanol obtenido por volumen y por tiempo.

Tabla 1. Comparación de parámetros cinéticos en diferentes soportes inmovilización de levaduras por adsorción física.

Soporte	Levadura	Concentración de células inmovilizadas (g/g)	Rendimiento (g etanol/g sustrato)	Productividad (g/L·h)	Referencia
Sin soporte (células libres)	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	N/R	2.55	Yu <i>et al.</i> , 2007
Aserrín con (dietilamino) etilo (DEAE)	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	0.375	N/R	Cha <i>et al.</i> , 2014
Astillas de madera	<i>S. cerevisiae</i>	0.032	0.47	8.60 +/- 0.60	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Bagazo de sorgo	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	0.47	5.72	Yu <i>et al.</i> , 2007
Bagazo de caña	<i>S. cerevisiae</i>	0.047	0.48	13.00 +/- 0.02	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Cáscara de naranja	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	N/R	6.275	Plessas <i>et al.</i> , 2007
Hoja de maíz	<i>S. cerevisiae</i>	0.0147	0.53	8.76 +/- 0.20	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Mazorca de maíz	<i>S. cerevisiae</i>	0.023	0.52	9.06 +/- 0.03	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Mazorca de maíz	<i>S. cerevisiae</i>	0.0222	0.51	3.35	Genisheva <i>et al.</i> , 2011
Pieles de uva	<i>S. cerevisiae</i>	0.0251	0.49	3.33	Genisheva <i>et al.</i> , 2011
Semillas de uva	<i>S. cerevisiae</i>	0.00168	0.51	3.41	Genisheva <i>et al.</i> , 2011
Tallos de uva	<i>S. cerevisiae</i>	0.00408	0.44	3.37	Genisheva <i>et al.</i> , 2011

Adicionalmente, en la Figura 3 se presenta una gráfica comparativa de la productividad entre diferentes soportes naturales donde se han inmovilizado células de *S. cerevisiae* y la de las células libres sin soporte. Genisheva *et al.*, (2011) ha reportado que la aplicación de residuos de la industria alimentaria puede traer ventajas sobre la inmovilización celular, debido a que el soporte contiene nutrientes que favorecen el desarrollo de las células que producen etanol.

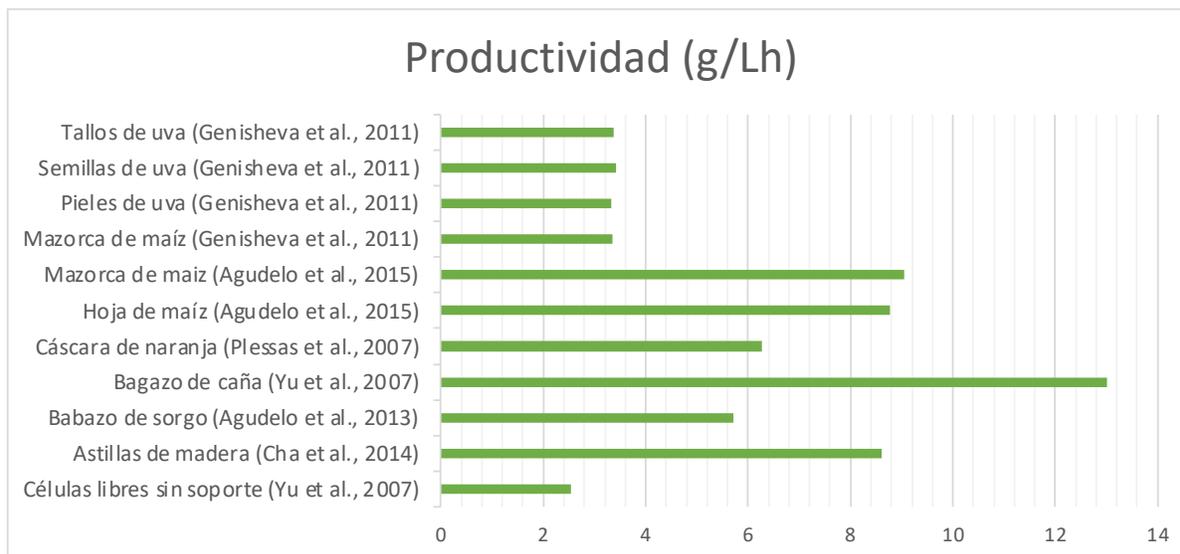


Figura 3. Comparación de la productividad respecto a los gramos de etanol obtenidos en diferentes soportes naturales.

## Conclusiones

Un soporte idóneo para la inmovilización celular debe contar con ciertas cualidades donde se vea favorecida la fijación de células, su manipulación y además que no presente cambios en su estructura como efecto del ambiente de fermentación. Los residuos lignocelulósicos presentan gran parte de estas cualidades agregando que pueden tener nutrientes que favorezcan el crecimiento celular y por ende la productividad del bioetanol. Como se presenta en el gráfico independientemente del soporte sólido en el que estén inmovilizadas las células, todos los procesos fermentativos inmovilizados tienen una mayor productividad que los procesos fermentativos con células libres. Al utilizar células inmovilizadas en un soporte sólido se logra una mayor densidad celular debido al aprovechamiento del área superficial, lo que resulta en una mejor productividad en un equipo de fermentación más pequeño, reduciendo así costos de inversión y costos operativos.

## Bibliografía

- Agudelo-Escobar, Lina., Salazar Álvarez, U., & Peñuela, M. (2012). Continuous production of ethanol in packed bed-bioreactors with immobilized yeast cells on lignocellulosic waste. *Dyna*, 79(174), 107-113.
- Cha, H. G., Kim, Y. O., Choi, W. Y., Kang, D. H., Lee, H. Y., & Jung, K. H. (2014). Evaluating Carriers for Immobilizing *Saccharomyces cerevisiae* for Ethanol Production in a Continuous Column Reactor. *Mycobiology*, 42(3), 249-255. DOI: <https://doi.org/10.5941/MYCO.2014.42.3.249>
- Eş, I., Vieira, J. D. G., & Amaral, A. C. (2015). Principles, techniques, and applications of biocatalyst immobilization for industrial application. *Applied microbiology and biotechnology*, 99, 2065-2082. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6390-y>
- Genisheva, Z., Mussatto, S. I., Oliveira, J. M., & Teixeira, J. A. (2011). Evaluating the potential of wine-making residues and corn cobs as support materials for cell immobilization for ethanol production. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 979-985. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.006>
- Kourkoutas, Y., Bekatorou, A., Banat, I. M., Marchant, R., & Koutinas, A. A. (2004). Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review. *Food microbiology*, 21(4), 377-397. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2003.10.005>
- Moreno-García, J., García-Martínez, T., Mauricio, J. C., & Moreno, J. (2018). Yeast immobilization systems for alcoholic wine fermentations: actual trends and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 9, 241. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00241>
- Plessas, S., Bekatorou, A., Koutinas, A. A., Soupioni, M., Banat, I. M., & Marchant, R. (2007). Use of *Saccharomyces cerevisiae* cells immobilized on orange peel as biocatalyst for alcoholic fermentation. *Bioresource Technology*, 98(4), 860-865. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.014>
- Rodríguez-Restrepo, Y. A., & Orrego, C. E. (2020). Immobilization of enzymes and cells on lignocellulosic materials. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 787-806. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00988-w>
- Yu, J., Zhang, X., & Tan, T. (2007). An novel immobilization method of *Saccharomyces cerevisiae* to sorghum bagasse for ethanol production. *Journal of biotechnology*, 129(3), 415-420. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.01.027>