

Artículos

Biocatalizadores mesoestructurados renovables: optimización en la producción sostenible de aromatizantes y saborizantes.



Germán Carrillo

Centro de Investigación y Tecnología Química,
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional
Córdoba (CITeQ-UTN-CONICET), Argentina
gcarrillo@frc.utn.edu.ar

Gabriel O. Ferrero

Centro de Investigación y Tecnología Química,
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional
Córdoba (CITeQ-UTN-CONICET), Argentina

Eliana G. Vaschetto

Centro de Investigación y Tecnología Química,
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional
Córdoba (CITeQ-UTN-CONICET), Argentina

Griselda A. Eimer

Centro de Investigación y Tecnología Química,
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional
Córdoba (CITeQ-UTN-CONICET), Argentina

Ingenio Tecnológico

vol. 7, e054, 2025

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN-E: 2618-4931

Periodicidad: Frecuencia continua

ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 13 febrero 2025

Aprobación: 10 marzo 2025

URL: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2665247001/>

Resumen: La industria de la Química Fina enfrenta el desafío de reducir su impacto ambiental sin comprometer la eficiencia de sus procesos. Así, la biotecnología ofrece una alternativa viable mediante el uso de reactivos ecoamigables y condiciones menos severas de operación que mejorarían el proceso tradicional. Este trabajo propone una ruta sostenible para la obtención de un soporte mesoporoso renovable derivado de biomasa, basado en la inmovilización enzimática sobre el mismo, combinando la selectividad de la proteína con la estabilidad del soporte. Para caracterizar la mesoporosidad del material se emplearon isothermas de adsorción de N₂ y TEM. Además, mediante Espectroscopía IR-TF se evaluó la inmovilización enzimática, determinándose que con 96 h de inmovilización y 400 mg_{lipasa}/g_{soporte} se obtendría el mayor contenido de enzima soportada. El biocatalizador resultante fue evaluado en la transesterificación entre acetato de vinilo y alcohol isoamílico, produciendo acetato de isoamilo a 40 °C y presión atmosférica. Se alcanzó un rendimiento del 65 % mol a éster y una conversión del 86 % mol a 20 h de reacción. Estos resultados evidenciaron el potencial del biocatalizador para la síntesis de ésteres saborizantes y aromatizantes, ofreciendo una alternativa más sustentable en comparación con los métodos industriales convencionales.

Palabras clave: sílica mesoporosa renovable, inmovilización de lipasa, producción sustentable de aromatizantes/saborizantes.

Abstract: The Fine Chemicals industry faces the challenge of reducing its environmental impact without compromising the efficiency of its processes. Thus, biotechnology offers a viable alternative using eco-friendly reagents and less severe operating conditions that would improve the traditional process. This work proposes a sustainable route for obtaining a renewable mesoporous support derived from biomass, based on enzymatic immobilization on it, combining protein selectivity with support stability. To characterize the mesoporosity of the material, N₂ adsorption isotherms and TEM were used. In addition, enzymatic immobilization was evaluated by IR-TF Spectroscopy, determining that with 96 h of immobilization and 400 mg_{lipase}/g_{support} the highest content of supported enzyme would be obtained. The resulting biocatalyst was

evaluated in the transesterification between vinyl acetate and isoamyl alcohol, producing isoamyl acetate at 40 °C and atmospheric pressure. After 20 h of reaction, a 65% mol yield to ester and a conversion of 86% mol were achieved. These results demonstrated the potential of the biocatalyst for the synthesis of flavorings and aromatizing esters, offering a more sustainable alternative compared to conventional industrial methods.

Keywords: renewable mesoporous silica, lipase immobilization, sustainable flavors production.

INTRODUCCIÓN

La industria química a lo largo de los años se ha enfrentado a grandes desafíos que abarcan la reducción de costos, la mejora de la calidad, la seguridad, la protección de la salud, los requisitos medioambientales, entre otros (Poppe et al., 2013). La catálisis es actualmente una de las encargadas de afrontar dichos desafíos provenientes de la industria, específicamente la Química Fina. Esta disciplina se caracteriza por la síntesis de compuestos químicos de muy alto valor agregado, tales como síntesis de principios activos para la industria farmacéutica, colorantes, sustancias utilizadas en la industria alimenticia, entre otros (Alcántara et al., 2011; Lantos et al., 2024; Schoemaker et al., 2003). En particular, un tipo de reacción orgánica que ha atraído el interés en la investigación científica durante la última década es la esterificación de ácidos carboxílicos con alcoholes de bajo peso molecular para la obtención de ésteres alifáticos. Los compuestos obtenidos por esta reacción pueden ser extraídos de fuentes naturales, producidos por síntesis química y/o rutas enzimáticas. (Vilas Bôas & de Castro, 2022). Una gran variedad de ésteres posee propiedades aromáticas distintivas y de allí deriva la denominación común de “aromatizantes”. Su producción a escala industrial se lleva a cabo haciendo reaccionar un alcohol con un ácido carboxílico en presencia de un catalizador homogéneo. En dicho proceso tradicional, se requieren una serie de pasos que implican un alto costo energético debido a las altas temperaturas y presiones a las que se trabaja, y un mantenimiento constante de los equipos a causa de los ácidos utilizados como catalizadores. En la actualidad se han empleado enzimas y fuentes microbianas en la producción de ésteres ya que ofrecen ventajas frente a las tecnologías convencionales. Un proceso biotecnológico brinda un mayor rendimiento y acelera las reacciones requiriendo condiciones moderadas en comparación con el proceso tradicional, siendo un campo prometedor para la industria de la Química Fina. (Dhake et al., 2013; Poornima & Preetha, 2017; Rios et al., 2018; Sheldon & Woodley, 2018). Para reacciones de esterificación y transesterificación, las enzimas más utilizadas son las lipasas, quienes tienen múltiples aplicaciones industriales (Ali et al., 2023; Vilas Bôas y de Castro, 2022). Sin embargo, las enzimas libres presentan varios problemas principalmente asociados a su vida útil acotada, su susceptibilidad frente a agentes externos y su dificultosa separación del medio de reacción. Es en ese punto donde la reutilización de enzimas se convierte en un factor crucial (Datta et al., 2013; Sheldon, 2007). Como respuesta a esta problemática, se ha podido demostrar que la inmovilización de lipasas sobre materiales inorgánicos como las sílicas mesoestructuradas, combina la selectividad de las reacciones enzimáticas con las propiedades químicas y mecánicas del soporte, desarrollando un efecto sinérgico enzima-soporte y proporcionando importantes mejoras en la actividad catalítica (Ferrero et al., 2016).

El destacado interés en el uso de sílices mesoporosas como soportes radica en que estos materiales presentan propiedades fisicoquímicas más favorables en comparación con otros sólidos porosos. Sus elevadas áreas superficiales (hasta 1000 m²/g), su alta resistencia mecánica y química, la capacidad de generar interacciones electrostáticas y la presencia de un sistema de poros ordenado en el rango de 2 a 10 nm les confieren ventajas significativas. Así es como pueden discriminar moléculas según su tamaño y facilitar la difusión de sustratos y productos en procesos catalíticos (Benzaquén et al., 2018; Carraro et al., 2024; Elías et al., 2009, 2012; Vaschetto et al., 2014) A pesar de los avances en su desarrollo, la síntesis de estos materiales aún enfrenta desafíos importantes, como los altos costos de producción, las dificultades de escalado y la

dependencia de reactivos tóxicos y costosos. En este contexto, el desarrollo de sílices derivadas de fuentes renovables surge como una alternativa prometedora, con un gran interés científico y tecnológico (Akinjokun et al., 2016). Siguiendo esta premisa, en nuestro grupo de investigación, se han utilizado agentes plantilla más baratos y disponibles comercialmente, como el monoestearato de glicerilo (MEG), derivado de la hidrólisis parcial de los triglicéridos, para obtener materiales mesoporosos de excelente calidad que fueron funcionalizados con hierro demostrando un buen % de degradación de glifosato (Vaschetto et al., 2023).

Aunque existen reportes de reacciones de transesterificación a partir de vías enzimáticas, no se ha informado la producción de ésteres aromáticos empleando una enzima inmovilizada sobre una sílice mesoporosa obtenida a partir de biomasa y sin el uso de solventes. Estos hallazgos resaltan la importancia de explorar estrategias más sostenibles para la producción de materiales mesoporosos y el diseño de biocatalizadores eficientes, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de procesos químicos más ecológicos y económicamente viables. Así, en el presente trabajo se inmovilizó la lipasa de *Pseudomonas fluorescens* en una matriz de sílice mesoporosa sintetizada a partir de un moldeante derivado de recursos biomásicos. El desarrollo del biocatalizador heterogéneo implica las ventajas de un sistema enzimático y un novedoso soporte, para estudiar la producción de un interesante compuesto de química fina, el acetato de isoamilo (aroma a banana) a partir de la transesterificación de acetato de vinilo con alcohol isoamílico en condiciones de reacción suaves (bajas temperaturas y presión atmosférica).

EXPERIMENTAL

SÍNTESIS DEL MATERIAL

Se sintetizó una sílice mesoporosa por medio del método sol-gel (Vaschetto et al., 2023). Por un lado, se partió del porógeno MEG (Merck) al que se le añadió etanol (Biopack, 99,5% V/V) y se llevó bajo agitación magnética a 60 °C. Luego, se preparó una segunda solución del precursor de silicio (tetraetoxisilano, TEOS, Sigma Aldrich, 98%) con HCl 2M (Cicarelli, 36,5-38% p/p), la cual también se llevó a agitación magnética a 60 °C. Esta última solución fue añadida lentamente a la primera y se la dejó en agitación a 60 °C. Posteriormente se adicionó fluoruro de sodio (NaF, Sigma Aldrich, P.A.) como iniciador de la condensación de la sílice. Finalmente, se sometió a tratamiento hidrotérmico a 85 °C por tres días, formándose un gel. El material fue filtrado, secado y calcinado en flujo de aire a 550 °C. A este sólido se lo designó M-MEG.

La enzima utilizada fue la lipasa de *Pseudomonas fluorescens* (L_{pf}) fue adquirida comercialmente de la empresa Sigma-Aldrich (cat N°: 28602) (Amano, 2008). El procedimiento para la inmovilización enzimática consistió en preparar una solución de lipasa *Pseudomonas fluorescens* (Amano, 2008) con una concentración de 5 mg/mL a partir de buffer fosfato 25 mM a pH=7,5 y se agregó una cantidad conocida del soporte M-MEG. La mezcla se mantuvo en agitación por rotación a temperatura ambiente en un recipiente hermético cerrado, variando el tiempo de contacto entre el soporte y la solución enzimática: 24 h, 48 h, 72 h, 96 h y 120 h. Transcurrido ese tiempo, la mezcla se centrifugó, se separó el sólido y a este se le realizaron sucesivos lavados con el buffer mencionado. El sólido resultante fue secado a temperatura ambiente por un día.

Por otra parte, para evaluar el contenido enzimático óptimo en el soporte, se prepararon soluciones de diferentes concentraciones teóricas de enzima. Las relaciones de enzima/soporte estudiadas fueron: 160, 240, 320, 400, 480 y 560 $mg_{lipasa}/g_{soporte}$. El tiempo de contacto entre la proteína y el soporte fue de 96h.

La designación de los materiales sintetizados fue M-MEG/ L_{pf} -Xh(z), siendo "X" la cantidad en horas que se dejó inmovilizando la solución de enzima con el soporte y "z" la carga nominal de enzima en $mg_{lipasa}/g_{soporte}$.

CARACTERIZACIÓN

La matriz silícea renovable (soporte) fue caracterizada por isoterma de adsorción/desorción de N_2 para estudiar la estructura. Para ello se empleó un sortómetro ASAP 2020 Plus 2.00. El análisis permitió calcular el área superficial mediante el método BET: Brunauer-Emmett-Teller (Dollimore et al., 1976). La distribución de tamaño de poros y el volumen de poros se determinaron mediante el método de Barrett-Joyner-Halenda (BJH) (Barrett et al., 1951) (Thommes et al., 2015). Se examinó también la estructura y el ordenamiento de los canales mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM), empleándose un JEOL JEM-2100 Plus, tensión de trabajo: 200 kV. La inmovilización enzimática en el soporte mesoporoso fue verificada por medio de Espectroscopía por Infrarrojo con Transformada de Fourier (IR-TF), empleándose un espectrómetro FTIR Nicolet iS10. Por medio de esta técnica se observan las bandas correspondientes a la presencia de los enlaces Amida I y Amida II, característicos de la estructura de las proteínas. (Ferrero et al., 2021).

EVALUACIÓN CATALÍTICA

El biocatalizador fue optimizado en términos de tiempo de inmovilización y carga nominal enzimática y posteriormente fue evaluado en la transesterificación de acetato de vinilo con alcohol isoamílico (solución madre) para la obtención de acetato de isoamilo. Para ello se preparó una solución madre en una relación molar $r = \text{alcohol isoamílico/acetato de vinilo} = 1,5$. Esta solución se separó en viales y se le añadió el sólido correspondiente. Para llevar a cabo la reacción, se sellaron los viales y se llevaron a un agitador orbital a 200 oscilaciones/min y a 40°C . Además, se realizó una reacción de control con el soporte mesoporoso M-MEG. Para todos los casos, se tomaron alícuotas de muestra de reacción desde 0 a 24h. Las muestras fueron centrifugadas y posteriormente inyectadas en un cromatógrafo gaseoso Perkin Elmer - Clarus 500 con detector de ionización de llama (FID) empleando una columna ZB-1. Se desarrolló y optimizó un método cromatográfico utilizando patrones cromatográficos, identificando los picos correspondientes y asignándolos a cada analito.

La conversión fue expresada como $C = (n_i - n_f)/n_i$, donde n_i : moles iniciales de acetato de vinilo y n_f : moles finales de acetato de vinilo. Por su parte, el rendimiento a acetato de isoamilo fue calculado como $R = C \times S/100$, donde S se definió como selectividad a producto principal, siendo $S = N_f/(N_f + N'f)$; N_f : moles de acetato de isoamilo y $N'f$: moles de acetaldehído.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La isoterma de adsorción/desorción de nitrógeno para la matriz M-MEG pudo ser clasificada como tipo IV, según IUPAC, característica de una estructura mesoporosa (Figura 1). Con su análisis pudo calcularse un conjunto de propiedades del material silíceo: área específica de $386,71\text{m}^2/\text{g}$, tamaño medio de poro alrededor de $8,4\text{ nm}$ (típico de estos materiales) y volumen de poros de $1,04\text{cm}^3/\text{g}$. Además, se obtuvo una distribución de tamaños de poros estrecha (Vaschetto et al., 2023). En la Figura 1 también se muestra una imagen TEM de la matriz M-MEG, esta presentó una mesoporosidad definida, evidenciada por la presencia de canales rectos dispuestos a lo largo del eje longitudinal (zona roja), como así también la disposición hexagonal de los mesoporos que puede apreciarse en una vista frontal de los mismos (zona amarilla) (Vaschetto et al., 2023).

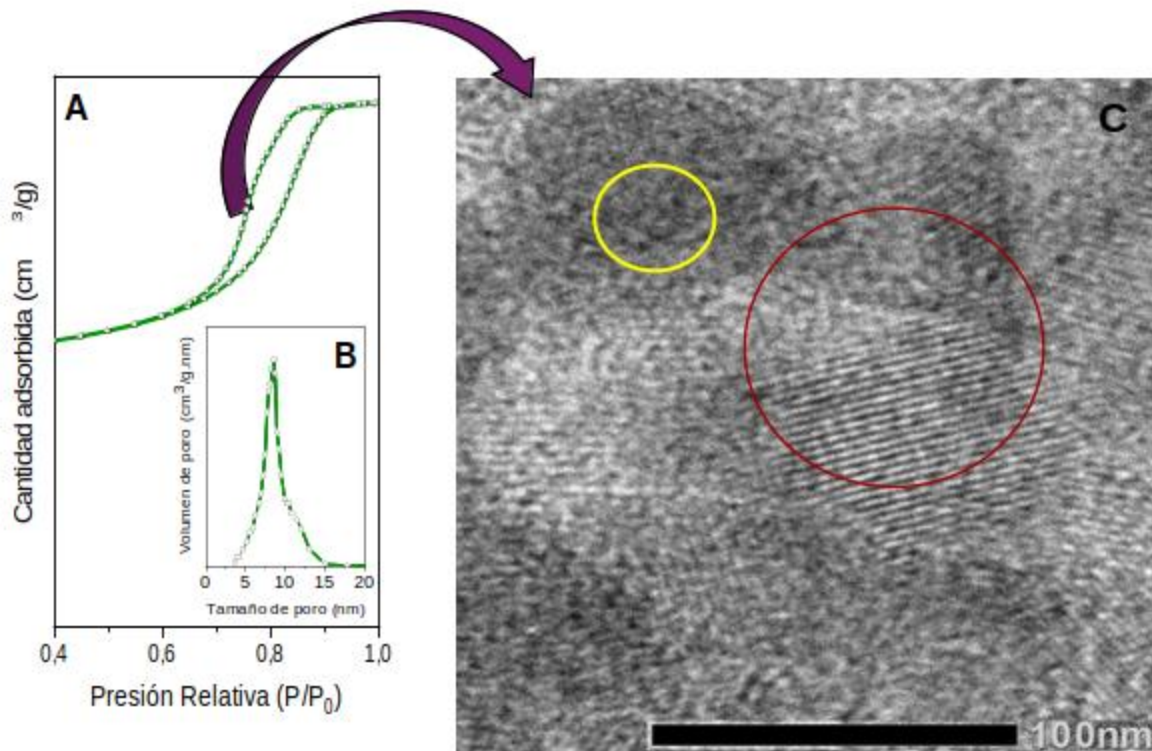


Figura 1.

Matriz M-MEG: A) Isotherma de adsorción/ desorción de N_2 . B) Distribución de tamaño de poros. C) Microscopía Electrónica de Transmisión.

Por su parte, la caracterización de la enzima libre y de todos los biocatalizadores preparados para una carga nominal de $400 \text{ mg lipasa/g soporte}$ con variación de tiempo de inmovilización: 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h se llevó a cabo por medio de Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier. Con la información de los espectros obtenidos se confeccionó la primera sección de la Tabla 1. En esta se presentan las relaciones entre las áreas asignadas a las Transmitancias para las bandas correspondientes al enlace Amida I (1645 cm^{-1}) de todos los biocatalizadores preparados más la enzima libre con variación de tiempo de inmovilización (carga nominal fija de $400 \text{ mg lipasa/g soporte}$): T_{1645} y las áreas asignadas a las Transmitancias para la banda correspondiente a la enzima libre a ese mismo número de onda: T_{*1645} . Puede observarse que, a medida que aumenta el tiempo de inmovilización desde 24h hasta las 96 h, la relación de áreas de transmitancia integradas también incrementa. Luego de este tiempo, el valor de la relación se mantiene constante. De esta tendencia podría deducirse que el aumento en el tiempo de contacto hasta 96 h favorecería el anclaje de la enzima en el soporte, por encima de este valor (120 h) el porcentaje de enzima anclada no se modificaría. Por lo analizado, inmovilizar por 96 h implicaría un ahorro energético de 24 h con respecto al máximo tiempo ensayado (120 h) por lo que se seleccionó 96 h como el tiempo óptimo de inmovilización.

Por otra parte, se realizaron los ensayos de caracterización por IR-TF de los biocatalizadores sintetizados a partir del soporte mesoporoso con un tiempo de inmovilización óptimo de 96 h y a cargas nominales variables de enzima por g de soporte: 160, 240, 320, 400, 480 y 560 mg lipasa/g soporte. Con un análisis similar al anterior, se cuantificaron las bandas asignadas al Enlace Amida I para todos los materiales (T_{1645}) y para la enzima libre (T_{*1645}). Con esta información se completó la Tabla 1, expresando los resultados como relación de Transmitancias integradas de las bandas IR. Como puede observarse, la relación aumenta con un incremento de la carga enzimática, desde 160 a 400 mg lipasa/g soporte. Con 400 mg lipasa/g soporte esta relación llega a un valor máximo y para cargas de 480 y 560 mg enzima/g soporte, no se lograría superar esta relación, lo que indicaría que se ha alcanzado la mayor carga de enzima anclada en el soporte renovable.

Tabla 1.

Relación de Transmitancias integradas para los biocatalizadores preparados para los tiempos de inmovilización ensayados y cargas nominales variables.

Biocatalizador		
Tiempo de inmovilización (h)	Carga nominal enzimática (mg lipasa/g soporte)	$(T_{1645}/T_{*1645})^a$
24	400	0,11
48	400	0,15
72	400	0,34
96	400	0,83
120	400	0,83
96	160	0,35
96	240	0,36
96	320	0,67
96	400	0,83
96	480	0,75
96	560	0,63

a: Relación de Transmitancias integradas de las bandas IR-TF a 1645cm^{-1} .

Debido a esto, el material que presentaría una carga nominal de proteína óptima sería aquel preparado con 400 mg de lipasa por gramo de soporte silíceo y un tiempo de inmovilización enzima-soporte de 96 h, M-MEG/ L_{pf} -96h(400).

La evaluación catalítica consistió en llevar a cabo la transesterificación de acetato de vinilo con alcohol isoamílico, a 40 °C, presión atmosférica, sin empleo de solventes y empleando como biocatalizador el material previamente optimizado. Se trata de una reacción que da como producto principal el acetato de isoamilo, el éster de interés. La particularidad que se presenta es que en paralelo a la reacción principal (transesterificación) se inicia una reacción de tautomerización del alcohol vinílico, que da como producto acetaldehído. Debido a su alta volatilidad este se elimina del medio a la temperatura de operación, favoreciéndose el rendimiento a producto deseado.

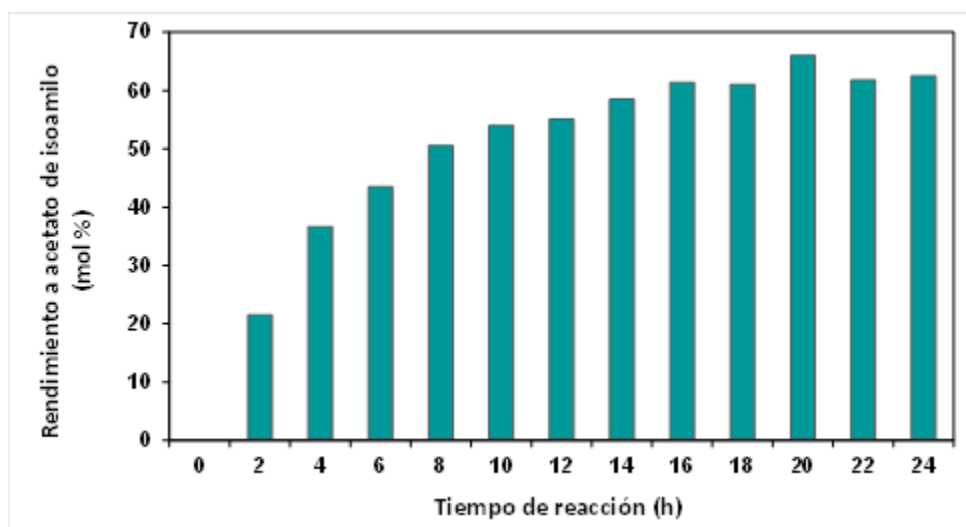


Figura 2.

Efecto del tiempo de reacción en el rendimiento (mol %) a acetato de isoamilo para el catalizador M-MEG/Lpf-96h(400). Condiciones de reacción: T= 40 °C, P= atmosférica y rpm= 200.

En la Figura 2 se representa el resultado de la evaluación catalítica utilizando el biocatalizador optimizado en función del tiempo de reacción: de 2 h hasta 24 h. Analizando el rendimiento a producto deseado, se puede observar que para tiempos cortos (comprendidos entre 2 h y 8 h) el sistema sigue un típico comportamiento lineal enzimático. Luego de este período, el rendimiento crece más lentamente, llegando a una meseta después de 18 h de reacción, con valores del orden del 62 % de rendimiento a acetato de isoamilo. Dichos valores se estabilizan hasta las 48 h (datos no mostrados).

Todas las experiencias fueron realizadas por triplicado para verificar reproducibilidad, reportándose un promedio entre los valores obtenidos.

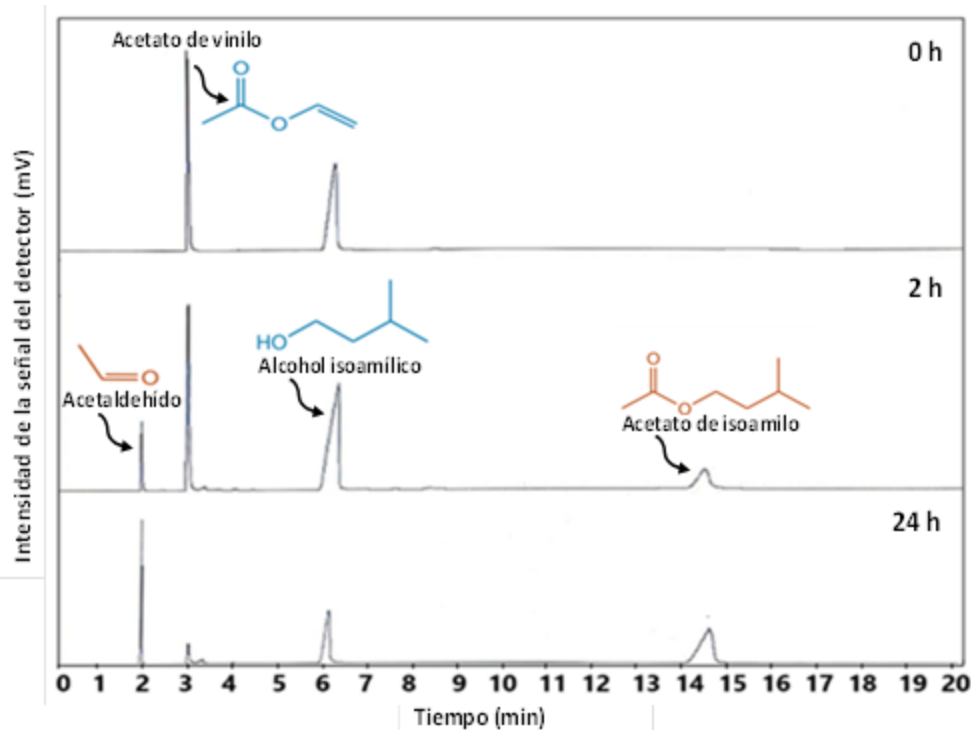


Figura 3.
Cromatogramas de las muestras de reacción (0, 2 y 24 h).

La figura 3 muestra cromatogramas de esta reacción, identificando los reactivos y productos, con sus correspondientes tiempos de retención. Como se muestra en la figura a $t=0$ h, la solución inicial muestra dos señales correspondientes a los reactivos: acetato de vinilo y alcohol isoamílico, que eluyen de la columna cromatográfica a 3 min y 6 min, respectivamente, según el método cromatográfico desarrollado. Por otro lado, a 2 h de reacción, cuando se utiliza el biocatalizador, se observa una reducción significativa de las señales para los dos reactivos. Esta disminución se acompaña de la aparición de nuevas señales, correspondientes al acetato de isoamilo y al acetaldehído ($t_{retención}=2$ min y 15 min, respectivamente) que son los productos de reacción. Este comportamiento se mantiene hasta las 24 h, con una reducción de las señales de los reactivos y una intensificación de las señales correspondientes a los productos de reacción, evidenciando el avance de la reacción y la formación de productos.

Finalmente, es importante destacar que el diseño de biocatalizadores debe contemplar especialmente la estabilidad y la factibilidad de recuperación del biocatalizador para su reúso. Para evaluar la estabilidad del biocatalizador en función del tiempo de almacenamiento, se determinó el rendimiento catalítico del M-MEG/*Lpf*-96h(400) después de 2, 4, 6 y 8 meses desde su preparación. El biocatalizador se mantuvo en un recipiente cerrado a temperatura ambiente durante los tiempos antes mencionados y posteriormente se procedió a su evaluación catalítica para determinar el rendimiento a acetato de isoamilo en las condiciones óptimas de reacción. Después de 8 meses de almacenamiento del biocatalizador, el rendimiento a acetato de isoamilo obtenido fue del 58,10% a las 24 h, lo que representaría que la enzima mantuvo su actividad en un 93%, respecto al biocatalizador fresco (recién sintetizado). El análisis evidencia que la enzima continúa activa, aun cuando el biocatalizador se encuentra almacenado, lo que demuestra la robustez del biocatalizador desarrollado (Tabla 2).

Tabla 2.

Producción de acetato de isoamilo mediante almacenamiento del biocatalizador durante 8 meses a temperatura ambiente.

Tiempo de almacenamiento (meses)	Rendimiento a acetato de isoamilo (mol %)
Catalizador fresco (0)	62,49
2 (dos)	60,40
4 (cuatro)	60,10
6 (seis)	58,39
8 (ocho)	58,10

Por otra parte, la reutilización del biocatalizador se evaluó mediante un experimento en el que, después de cada ciclo de reacción, el biocatalizador se recuperó por centrifugación, se secó a 40°C durante 24 h y luego se reincorporó a una nueva solución madre, partiendo de reactivos frescos. La actividad del biocatalizador solo disminuyó un 25 % en el tercer ciclo catalítico. Este comportamiento es probablemente debido a la lixiviación enzimática, un fenómeno inherente al tipo de inmovilización utilizado (adsorción sobre un soporte).

Finalmente, estos experimentos han permitido optimizar un conjunto de variables en el diseño de un biocatalizador heterogéneo avanzado sintetizado a partir de un soporte silíceo preparado por una metodología sustentable. Su aplicación como catalizador en la obtención de acetato de isoamilo, éster muy utilizado como aromatizante y saborizante, permitió operar en condiciones más suaves que las industriales (presión atmosférica, 40°C y sin uso de solventes) lográndose un buen rendimiento. Más aún, con la posibilidad de su reutilización en diversos ciclos catalíticos o con el diseño de un sistema en continuo, ofrecería nuevas oportunidades para la aplicación de este novedoso material renovable en la producción de compuestos de alto valor agregado.

Así, combinando la catálisis enzimática con el diseño de la ingeniería de materiales, mediante precursores renovables, se logró la optimización de un proceso biotecnológico en reemplazo de los sistemas convencionales. Estos últimos, involucran etapas complejas para la purificación de productos, condiciones severas de operación e implican un mantenimiento constante de equipamientos debido a las características corrosivas de los catalizadores homogéneos empleados (ej. ácido sulfúrico). Debido a esto, los biocatalizadores sintetizados aquí ofrecerían una alternativa para su potencial comercialización en la industria química.

CONCLUSIONES

Se logró sintetizar un material silíceo mesoporoso empleando un agente plantilla más sustentable derivado de biomasa. La estructura mesoporosa fue confirmada mediante Isotermas de adsorción/desorción de N_2 y TEM, evidenciando características fisicoquímicas típicas de estos materiales. A partir de este soporte, se desarrollaron biocatalizadores mediante la inmovilización enzimática de la lipasa de *Pseudomonas fluorescens*.

El biocatalizador resultante mostró una destacada actividad en la reacción de transesterificación entre acetato de vinilo y alcohol isoamílico para la obtención de acetato de isoamilo, operando en condiciones suaves y eco-amigables (40 °C, presión atmosférica y sin solventes). A las 24 h de reacción, se obtuvo un rendimiento del 62 % en acetato de isoamilo, saborizante clave en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. Además, la posibilidad de recuperarlo y reutilizarlo y su estabilidad al permanecer almacenado a temperatura ambiente, refuerzan su potencial aplicabilidad.

Nuestra investigación sienta las bases para el desarrollo de materiales más sostenibles en la producción de aromatizantes y saborizantes de interés industrial, contribuyendo a procesos más eficientes y cercanos a lo que se consideran "naturales", con un alto valor añadido en la industria de los químicos finos, con grandes perspectivas a optimizar procesos en el área de la biocatálisis.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET y a la UTN por el apoyo financiero.

Referencias

- Akinjokun, A. I., Ojumu, T. V. & Ogunfowokan, A. O. (2016). Biomass, Abundant Resources for Synthesis of Mesoporous Silica Material. In *Microporous and Mesoporous Materials*. <https://doi.org/10.5772/63463>
- Alcántara, A. R., Hernaiz, M. J. & Sinisterra, J. V. (2011). Biocatalyzed Production of Fine Chemicals. In *Comprehensive Biotechnology, Second Edition* (Vol. 3, pp. 309–331). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00225-7>
- Ali, S., Khan, S. A., Hamayun, M. & Lee, I. J. (2023). The recent advances in the utility of microbial lipases: A Review. *Microorganisms*, *11*, 510. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020510>
- Amano, L. A. K. (2008). Lipase AK"Amano". *Amano Labs*, 1–2.
- Barrett, E. P., Joyner, L. G. & Halenda, P. P. (1951). The Determination of Pore Volume and Area Distributions in Porous Substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, *73*(1), 373–380. <https://doi.org/10.1021/ja01145a126>
- Benzaquén, T. B., Barrera, D. A., Carraro, P. M., Sapag, K., Alfano, O. M. & Eimer, G. A. (2018). *Nanostructured catalysts applied to degrade atrazine in aqueous phase by heterogeneous photo-Fenton process*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-018-2348-9>
- Carraro, P. M., Nope, E., Sathicq, Á. G., Romanelli, G. P. & Eimer, G. A. (2024). Effect of Hierarchical Architecture of Nickel Modified Mesoporous Catalysts on the Knoevenagel Condensation Reaction. *ChemistrySelect*, *9*(43), e202402552. <https://doi.org/10.1002/slct.202402552>
- Datta, S., Christena, L. R. & Rajaram, Y. R. S. (2013). Enzyme immobilization: an overview on techniques and support materials. *3 Biotech*, *3*(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13205-012-0071-7>
- Dhake, K. P., Thakare, D. D. & Bhanage, B. M. (2013). Lipase: A potential biocatalyst for the synthesis of valuable flavour and fragrance ester compounds. *Flavour and Fragrance Journal.*, *28*(2), 71–83. <https://doi.org/10.1002/ffj.3140>
- Dollimore, D., Spooner, P. & Turner, A. (1976). The BET Method of analysis of gas adsorption data and its relevance to the calculation of surface areas. *Surface Technology*, *4*, 121.
- Elías, Crivello, M., Herrero, E., Casuscelli, S. & Eimer, G. A. (2009). Some considerations to optimize the synthesis procedure and the structural quality of mesostructured silicas. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *355*(22–23), 1269–1273. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2009.04.019>
- Elías, Sabre, E., Sapag, K., Casuscelli, S. & Eimer, G. (2012). Influence of the Cr loading in Cr/MCM-41 and TiO₂/Cr/MCM-41 molecular sieves for the photodegradation of Acid Orange 7. *Applied Catalysis A: General*, *413–414*, 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.11.019>
- Ferrero, G. O., Faba, E. M. S. & Eimer, G. A. (2021). Biodiesel production from alternative raw materials using a heterogeneous low ordered biosilicified enzyme as biocatalyst. *Biotechnol Biofuels.*, *14*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01917-x>
- Ferrero, G. O., Rojas, H. J., Argaraña, C. E. & Eimer, G. A. (2016). Towards sustainable biofuel production: Design of a new biocatalyst to biodiesel synthesis from waste oil and commercial ethanol. *Journal of Cleaner Production*, *139*, 495–503. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.08.047>

- Lantos, J., Kumar, N. & Saha, B. (2024). A Comprehensive Review of Fine Chemical Production Using Metal-Modified and Acidic Microporous and Mesoporous Catalytic Materials. *Catalysts*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/catal14050317>
- Poornima, K. & Preetha, R. (2017). Biosynthesis of food flavours and fragrances - A review. *Asian Journal of Chemistry*, 29(11), 2345–2352. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20748>
- Poppe, J. K., Garcia-Galan, C., Matte, C. R., Fernandez-Lafuente, R., Rodrigues, R. C. & Ayub, M. A. Z. (2013). Optimization of synthesis of fatty acid methyl esters catalyzed by lipase B from *Candida antarctica* immobilized on hydrophobic supports. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 94, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2013.05.010>
- Rios, N. S., Pinheiro, B. B., Pinheiro, M. P., Bezerra, R. M., dos Santos, J. C. S. & Barros Gonçalves, L. R. (2018). Biotechnological potential of lipases from *Pseudomonas*: Sources, properties and applications. *Process Biochemistry*, 75, 99–120. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.09.003>
- Schoemaker, H. E., Mink, D. L. & Wubbols, M. G. (2003). Dispelling the myths - Biocatalysis in industrial synthesis. *Science*, 299, 1694–1697. <https://doi.org/10.1126/science.1079237>
- Sheldon, R. A. (2007). Enzyme immobilization: The quest for optimum performance. *Advanced Synthesis and Catalysis*, 349(8–9), 1289–1307. <https://doi.org/10.1002/adsc.200700082>
- Sheldon, R. A. & van Pelt, S. (2013). Enzyme immobilisation in biocatalysis: Why, what and how. *Chemical Society Reviews*, 42(15), 6223–6235. <https://doi.org/10.1039/c3cs60075k>
- Sheldon, R. A. & Woodley, J. M. (2018). Role of Biocatalysis in Sustainable Chemistry. *Chemical Reviews*, 118(2), 801–838. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00203>
- Singh, V. & Chakarvarti, S. K. (2016). Biotemplates and their uses in nanomaterials synthesis: A review. *American Journal of Bioengineering and Biotechnology*, 2, 1–14. <https://doi.org/10.7726/ajbebt.2016.1001>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J. & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Vaschetto, E. G., Ochoa Rodríguez, P. A., Pérez Pariente, J. & Eimer, G. A. (2023). Engineering more sustainable catalysts based in ecological and economic synthesis routes from renewable raw material: Novel mesoporous silicas for remediation technologies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 360, 112719. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2023.112719>
- Vaschetto, E. G., Pecchi, G. A., Casuscelli, S. G. & Eimer, G. A. (2014). Nature of the active sites in Al-MCM-41 nano-structured catalysts for the selective rearrangement of cyclohexanone oxime toward ϵ -caprolactam. *Microporous and Mesoporous Materials*, 200, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.08.030>
- Vilas Bôas, R. N. & de Castro, H. F. (2022). A review of synthesis of esters with aromatic, emulsifying, and lubricant properties by biotransformation using lipases. *Biotechnology and Bioengineering*, 119(3), 725–742. <https://doi.org/10.1002/bit.28024>
- Yasutaka, K., Takato, Y., Takashi, K., Kohsuke, M. & Hiromi, Y. (2011). Enhancement in adsorption and catalytic activity of enzymes immobilized on phosphorus- and calcium-modified MCM-41. *Journal of Physical Chemistry B*, 115(34), 10335–10345. <https://doi.org/10.1021/jp203632g>

AmeliCA

Disponible en:

<https://portal.amelica.org/ameli/ameli/journal/266/2665247001/2665247001.pdf>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en portal.amelica.org

AmeliCA

Ciencia Abierta para el Bien Común

Germán Carrillo, Gabriel O. Ferrero, Eliana G. Vaschetto,
Griselda A. Eimer

**Biocatalizadores mesoestructurados renovables:
optimización en la producción sostenible de
aromatizantes y saborizantes.**

Ingenio Tecnológico

vol. 7, e054, 2025

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ingenio@frlp.utn.edu.ar

ISSN-E: 2618-4931



CC BY-NC-SA 4.0 LEGAL CODE

**Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-
CompartirIgual 4.0 Internacional.**