

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,  
Volumen 10, Número 1.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v10i1](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1)

## **CARACTERIZACIÓN DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES: CITRUS SINENSIS, ANANAS COMOSUS Y DIOSPYROS NIGRA**

**CHARACTERIZATION OF SECOND GENERATION  
BIOETHANOL FROM AGRO-INDUSTRIAL WASTE:  
CITRUS SINENSIS, ANANAS COMOSUS AND  
DIOSPYROS NIGRA**

**Fabián Jesús Rendón Hernández**

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

**José Luis Gutiérrez Díaz**

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

**Jorge Avelino Domínguez Patiño**

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v10i1.22790](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1.22790)

## Caracterización de Bioetanol de Segunda Generación de Residuos Agroindustriales: Citrus Sinensis, Ananas Comosus y Diospyros Nigra

**Fabián Jesús Rendón Hernández<sup>1</sup>**[fabian.rendon@uaem.mx](mailto:fabian.rendon@uaem.mx)<https://orcid.org/0000-0003-3757-043X>Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Morelos – México**José Luis Gutiérrez Díaz**[fabian.rendon@uaem.mx](mailto:fabian.rendon@uaem.mx)<https://orcid.org/0000-0001-5491-5773>Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Morelos – México**Jorge Avelino Domínguez Patiño**[fabian.rendon@uaem.mx](mailto:fabian.rendon@uaem.mx)<https://orcid.org/0000-0002-7495-6887>Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Morelos – México

### RESUMEN

En el marco de la economía circular, la valorización de biomasa residual es estratégica para la descarbonización del transporte. Esta investigación evalúa la producción de bioetanol de segunda generación (2G) a partir de residuos lignocelulósicos agroindustriales: exocarpos de naranja (*Citrus sinensis*), piña (*Ananas comosus*) y zapote negro (*Diospyros nigra*). La metodología integró pretratamiento físico y fermentación anaerobia con *Saccharomyces cerevisiae*, estableciendo una cinética de reacción de 96 horas. Para la ruptura del azeótropo agua-etanol, se aplicó una deshidratación mediante óxido de calcio (CaO) biogénico sintetizado a partir de residuos de cascarón de huevo. La caracterización cromatográfica reportó purezas de 93.16% (naranja), 92.38% (zapote) y 90.20% (piña). Los destilados de naranja y zapote satisfacen la especificación de la norma ASTM D4806-11a (>92.1%). Se concluye que estas matrices son viables para formular aditivos oxigenantes en mezclas combustibles (E5, E10), validando una ruta de biorefinería eficiente y sustentable.

**Palabras clave:** bioetanol 2g, valorización lignocelulósica, CaO biogénico, norma ASTM D4806, aditivos oxigenantes

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [fabian.rendon@uaem.mx](mailto:fabian.rendon@uaem.mx)

# Characterization of Second Generation Bioethanol from Agro-industrial Waste: *Citrus Sinensis*, *Ananas Comosus* and *Diospyros Nigra*

## ABSTRACT

Within the framework of the circular economy, residual biomass valorization is a strategic approach for decarbonizing the transport sector. This research evaluates the production of second-generation (2G) bioethanol from agro-industrial lignocellulosic residues: orange (*Citrus sinensis*), pineapple (*Ananas comosus*), and black sapote (*Diospyros nigra*) exocarps. The methodology integrated physical pretreatment and anaerobic fermentation using *Saccharomyces cerevisiae*, establishing an optimal reaction kinetics of 96 hours. To break the water-ethanol azeotrope, dehydration was performed using biogenic calcium oxide (CaO) synthesized from eggshell waste. Chromatographic characterization indicated purities of 93.16% (orange), 92.38% (black sapote), and 90.20% (pineapple). Both orange and black sapote distillates meet the purity specifications of the ASTM D4806-11a standard (>92.1%). It is concluded that these residual matrices are viable feedstocks for formulating oxygenating additives in fuel blends (E5, E10), validating an efficient and sustainable biorefinery route.

**Keywords:** 2G bioethanol, lignocellulosic valorization, biogenic CaO; ASTM D4806 standard, oxygenating additives

*Artículo recibido 02 enero 2026  
Aceptado para publicación: 30 enero 2026*



## INTRODUCCIÓN

Históricamente, el desarrollo industrial y económico de la humanidad ha estado intrínsecamente ligado a la disponibilidad de materia y energía. No obstante, en el siglo XXI, el modelo energético predominante enfrenta una crisis estructural: el inminente agotamiento de las reservas de hidrocarburos y la volatilidad de sus precios representan una amenaza para la seguridad energética global (Bailey 1996). Según datos recientes, los combustibles fósiles continúan suministrando más del 80% de la demanda de energía primaria mundial, con un 57.7% de este consumo concentrado exclusivamente en el sector transporte. Esta dependencia ha consolidado a dicho sector como uno de los mayores contribuyentes a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono ( $CO_2$ ), exacerbando el calentamiento global y el cambio climático. Ante este escenario crítico, la transición hacia fuentes renovables y la diversificación de la matriz energética son imperativos ineludibles (Salinas y Gasca 2009).

En este contexto, el bioetanol se ha posicionado como el biocombustible líquido de mayor proyección para la descarbonización del transporte, actuando como oxigenante en gasolinas para mejorar la combustión y reducir emisiones contaminantes (Fargione 2008). Sin embargo, su producción convencional ("Primera Generación" o 1G), basada en cultivos amiláceos y sacaríferos como el maíz y la caña de azúcar, plantea un dilema ético y económico conocido como la disyuntiva "alimentos vs. combustibles", al competir por tierras arables y recursos hídricos esenciales para la seguridad alimentaria. Esta limitante ha catalizado la investigación hacia el bioetanol de segunda generación (2G), una alternativa que valoriza la biomasa lignocelulósica residual. Se estima que anualmente se generan a nivel mundial aproximadamente 1,600 millones de toneladas de residuos sólidos agroindustriales; el aprovechamiento de estos pasivos ambientales permite desacoplar la producción energética del mercado alimentario, integrándose en los principios de la economía circular (Escobar et al., 2009).

La literatura científica internacional ha validado que los residuos lignocelulósicos estructuras complejas formadas por celulosa, hemicelulosa y lignina constituyen un reservorio abundante de azúcares fermentables, aunque su recalcitrancia requiere tecnologías de pretratamiento avanzadas. Investigaciones en Japón, por ejemplo, han explorado la deslignificación oxidativa mediante ozono, mientras que en Estados Unidos se han optimizado procesos de fraccionamiento empleando ácido



fosfórico y solventes orgánicos (organosolv) (Madigan et al., 2000; Pretorius et al., 2003). En el ámbito iberoamericano, estudios en España han logrado avances significativos en la Sacarificación y Fermentación Simultánea (SSF) utilizando cepas robustas como *Kluyveromyces marxianus* en biomasa maderera (Vasudevan et al., 2005; Ryan et al., 2006). A nivel latinoamericano, la estrategia se ha enfocado en la hidrólisis de residuos tropicales endémicos. Reportes en Venezuela y Colombia han demostrado la viabilidad de obtener azúcares reductores a partir de bagazo de caña, pulpa de café y, notablemente, residuos frutícolas, utilizando hidrólisis ácida y fermentación clásica con *Saccharomyces cerevisiae* (Hall et al., 1993).

Específicamente, los exocarpos (cáscaras) de frutas, que pueden representar entre el 45% y 60% del peso total del fruto, son matrices con alto potencial energético que actualmente permanecen subutilizadas (Goettemoeller., 2007). A pesar de estos avances en la etapa de conversión, la producción de bioetanol anhidro enfrenta una barrera termodinámica crítica en la etapa de purificación, la formación de un azeótropo etanol-agua (95.6% etanol y 4.4% agua en peso). Esta limitante física impide obtener purzas superiores mediante destilación convencional, obligando al uso de operaciones unitarias complejas y energéticamente intensivas, como la destilación azeotrópica con benceno o el uso de tamices moleculares, para alcanzar el grado combustible (>99%) (Hall et al., 1993; Ahn et al., 1995; Peterson y Reece 1996).

La presente investigación plantea la hipótesis de que es técnica y ecológicamente viable producir bioetanol de segunda generación que cumpla con los estándares de calidad para mezclas (referenciados en la norma ASTM D4806-11a), valorizando residuos locales de *Citrus sinensis* (naranja), *Ananas comosus* (piña) y *Diospyros nigra* (zapote negro). Para validar esta premisa, el diseño experimental integra la optimización cinética de la fermentación anaerobia con *S. cerevisiae* y propone una innovación sustentable en la ingeniería de separación, la deshidratación del alcohol mediante adsorción química utilizando óxido de calcio (CaO) biogénico, sintetizado a partir de la calcinación de residuos de cascarón de huevo. Esta metodología busca no solo demostrar la eficiencia de estas materias primas no convencionales, sino también cerrar el ciclo de sustentabilidad al emplear un subproducto calcáreo para la ruptura del azeótropo, ofreciendo una alternativa de "Química Verde" frente a los métodos de deshidratación industriales convencionales (Álvarez 2009).



## MARCO TEÓRICO

### Fundamentos del Bioetanol y Clasificación de la Biomasa

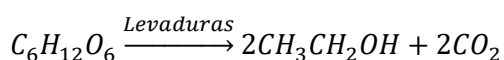
El bioetanol (alcohol etílico) es un compuesto químico líquido, incoloro e inflamable con fórmula  $CH_3CH_2OH$  obtenido mediante la fermentación de azúcares contenidos en materia orgánica (Mousdale 2008). Se distingue de los combustibles fósiles por su carácter renovable y su capacidad para oxigenar gasolinas, reduciendo emisiones de monóxido de carbono y precursores de ozono (Gonzales 2009).

La teoría clasifica la materia prima para su producción en tres generaciones, dependiendo de su procedencia y competencia con la alimentación:

- Primera Generación: Producido a partir de cultivos alimentarios con alto contenido de almidón (maíz, trigo) o sacarosa (caña de azúcar, remolacha).
- Segunda Generación: Obtenido de la hidrólisis de materiales lignocelulósicos como madera y paja.
- Tercera Generación: Enfoque de esta investigación. Se produce a partir de residuos agroindustriales y biomasa desvalorizada (cáscaras de frutas, RSU), aprovechando la celulosa y hemicelulosa sin comprometer la seguridad alimentaria. Específicamente, las cáscaras de frutas como naranja y piña contienen carbohidratos fermentables que representan entre el 45% y 60% del peso de la fruta, constituyendo una fuente energética subutilizada.

Bioquímica de la Fermentación Alcohólica.

La fermentación alcohólica se define como un proceso biológico anaerobio (en ausencia de oxígeno) en el cual microorganismos procesan hidratos de carbono (glucosa, fructosa) para obtener energía, generando etanol y dióxido de carbono como productos metabólicos finales (Timilsina y Shrestha 2010). La estequiometría general de la reacción se representa como:



El proceso no es lineal y atraviesa tres fases cinéticas:

- 1) Fase de inducción (adaptación y multiplicación celular).
- 2) Fase tumultuosa (máxima producción de gas y alcohol con elevación de temperatura).
- 3) Fase lenta (descenso de actividad por agotamiento de nutrientes) (Ganatsios et al., 2014; Giovani et al., 2012).



Factores como la acidez (pH óptimo 3.5-5.5) y la temperatura son críticos; temperaturas superiores a 55°C provocan la muerte celular y el cese de la fermentación (Vicente et al., 2004).

*Saccharomyces cerevisiae*.

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es el microorganismo predominante en la industria del etanol debido a su eficiencia en la conversión de azúcares y su tolerancia a niveles moderados de alcohol (Azhar et al., 1981). Este microorganismo es un anaerobio facultativo; aunque puede respirar en presencia de oxígeno, la producción de etanol requiere condiciones estrictamente anaerobias para evitar el "Efecto Pasteur", que inhibiría la ruta fermentativa en favor de la respiración aeróbica (Aiello et al., 1996; Ahring et al., 1999; Aoyama y Seki 1999; Abbi et al., 1996). Su rango térmico óptimo de operación se sitúa entre 28°C y 35°C.

### **Destilación y Azeótropos.**

La recuperación del etanol se realiza mediante destilación, una operación unitaria que separa componentes basándose en sus diferentes puntos de ebullición (etanol: 78°C, agua: 100°C). Sin embargo, el sistema etanol-agua presenta una limitación termodinámica: forma una mezcla azeotrópica (Budny 2007). Esto significa que, al llegar a una concentración aproximada del 95-96% de etanol, la composición del vapor es igual a la del líquido, haciendo imposible una mayor purificación mediante destilación simple (Parés y Juárez 1997; Genisheva et al., 2014).

Deshidratación Química y Normativa.

Para romper el azeótropo y obtener etanol anhidro apto para mezclas con gasolina, se requiere un proceso de deshidratación. La teoría de la "Química Verde" propone el uso de Óxido de Calcio ( $CaO$ ), conocido como cal viva, que reacciona químicamente con el agua residual para formar Hidróxido de Calcio [ $Ca(OH)_2$ ], un compuesto insoluble en alcohol que precipita y permite separar el etanol puro.

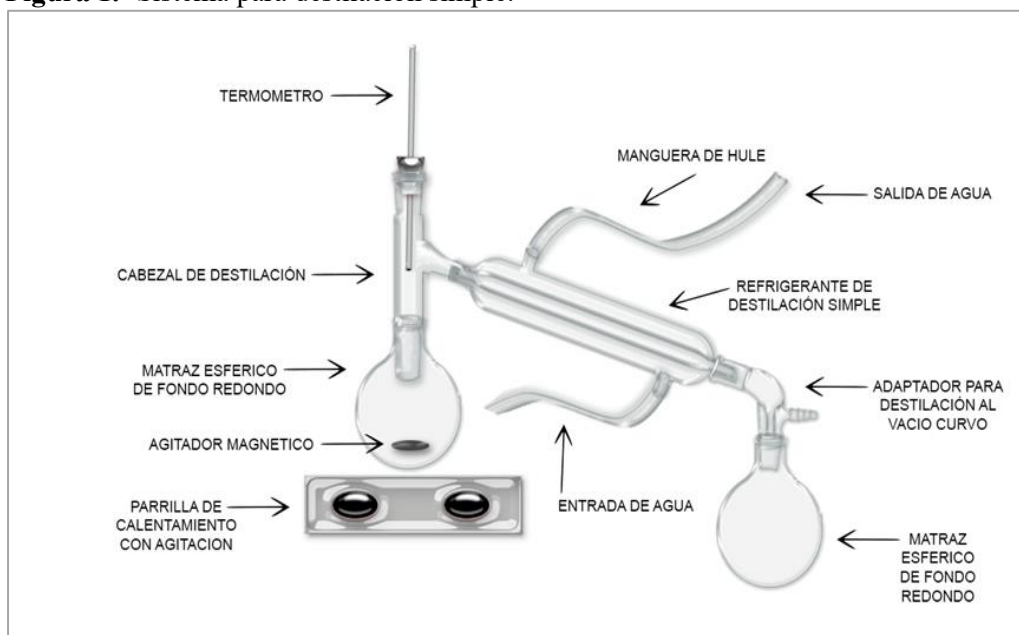
La viabilidad comercial del producto se rige bajo la norma internacional ASTM D4806-11a, la cual establece que el bioetanol destinado a mezclas combustibles debe poseer una pureza mínima del 92.1% en volumen, estar libre de partículas suspendidas y mantener un contenido de metanol inferior al 0.5% (Cabrera et al., 2000).



## METODOLOGÍA.

### Materiales

**Figura 1.-** Sistema para destilación simple.



### Reactivos

Para la experimentación se recolectaron residuos agroindustriales de tres especies vegetales: cáscaras de *Citrus sinensis* (naranja), cáscaras de *Ananas comosus* (piña) y pulpa de *Diospyros digyna* (zapote negro). Como agente biológico se empleó la levadura comercial *Saccharomyces cerevisiae* (cepa Nevada-LESAFFRE). Para la síntesis del agente deshidratante se utilizaron cascarones de huevo residuales y agua destilada como solvente universal.

Preparación del Sustrato y Pretratamiento.

La biomasa recolectada fue sometida a una reducción de tamaño mediante trituración mecánica y molienda.

Se prepararon muestras de 100 g de materia prima, a las cuales se añadió agua en una proporción del 20% respecto al peso del sustrato para facilitar la homogeneización y la disponibilidad de azúcares fermentables en el medio acuoso.

**Figura 2.-** Biomasa.



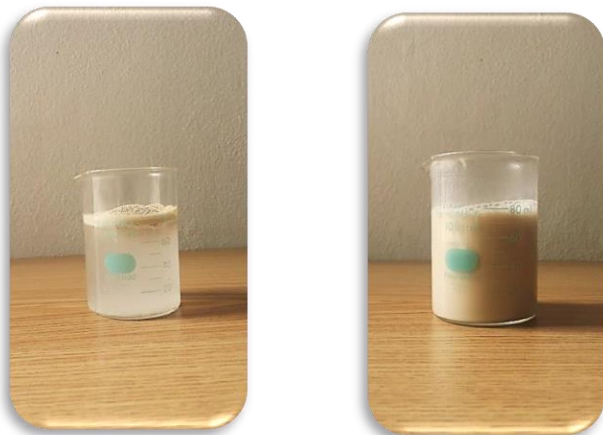
**Figura 3.-** Biomasa triturada.



### **Configuración de la Fermentación Anaerobia.**

El inóculo se preparó activando la levadura *S. cerevisiae* en una concentración de 1.2 g/L diluida en 10 ml de agua tibia para estimular la actividad metabólica previa a la inoculación. La solución activada se incorporó al sustrato preparado en biorreactores de vidrio de 100 ml.

**Figura 4.-** Dilución de la levadura.



Para garantizar la anaerobiosis estricta requerida por la ruta metabólica fermentativa, los reactores se sellaron herméticamente utilizando válvulas de alivio de presión (globos) que permitieron la expansión de gases sin entrada de oxígeno. El proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente durante un tiempo de residencia de 4 días (96 horas), periodo identificado experimentalmente como el punto de máxima eficiencia cinética antes del descenso en la producción de alcohol

**Figura 5.-** Fermentación.



#### **Sistema de Separación Térmica (Destilación y Rectificación).**

La recuperación del bioetanol se realizó mediante un sistema de destilación simple equipado con matraz de fondo redondo, cabezal de destilación, termómetro y condensador. El proceso se dividió en dos etapas térmicas:

- 1) Destilación Primaria: El mosto fermentado fue calentado a 80°C durante 3.5 horas para separar la fracción volátil del residuo sólido.
- 2) Rectificación: El destilado primario se sometió a una segunda destilación a 78°C durante 50 minutos con el objetivo de elevar la concentración alcohólica y eliminar impurezas de mayor punto de ebullición.

**Figura 6.-** Destilación primaria (izquierda) y rectificación (derecha).



### Purificación y Deshidratación mediante Química Verde.

Para romper el azeótropo etanol-agua y alcanzar la pureza requerida por la norma ASTM, se implementó un proceso de adsorción reactiva utilizando Óxido de Calcio ( $CaO$ ) biosintetizado.

Síntesis del  $CaO$ :

Se calcinaron residuos de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) provenientes de cascarones de huevo a  $950\text{ }^\circ\text{C}$  durante 3.5 horas para obtener cal viva ( $CaO$ ).

**Figura 7.-** Producción de óxido de calcio ( $CaO$ ) con cascarones de huevo por calcinación.



### Proceso de Deshidratación:

Se adicionaron 25 g de  $CaO$  por cada litro de bioetanol rectificado. La mezcla se mantuvo en agitación durante 20 minutos y posteriormente en reposo por 24 horas, permitiendo la reacción irreversible del óxido con el agua residual para formar hidróxido de calcio insoluble. Finalmente, se realizó una destilación flash para recuperar el bioetanol anhidro.

**Figura 8.-** Deshidratación del etanol.



### **Caracterización y Análisis Cromatográfico.**

La cuantificación de la pureza final y la detección de contaminantes (metanol y agua residual) se realizó mediante Cromatografía de Gases (GC). Los cromatogramas resultantes se analizaron mediante la integración del área bajo la curva de los picos de retención para determinar el porcentaje volumen/volumen (% v/v) de etanol. Los resultados obtenidos se contrastaron con las especificaciones de calidad establecidas en la norma internacional ASTM D4806-11a para biocombustibles

### **Seguridad y Manejo de Muestras.**

Las muestras finales se almacenaron en frascos color ámbar en condiciones de nula luminosidad y baja temperatura para evitar la foto-oxidación y la volatilización. Se implementaron protocolos de seguridad para la ventilación de gases ( $CO_2$ ) y el manejo de residuos cáusticos derivados de la hidratación de la cal.

**Figura 9.-** Almacenamiento de las muestras de etanol.



## **RESULTADOS.**

### **Cinética de Fermentación y Rendimiento Volumétrico.**

El monitoreo del proceso fermentativo se realizó durante un periodo de seis días para determinar el tiempo de residencia óptimo. El análisis de la producción diaria de destilado evidenció un comportamiento cinético similar en los tres sustratos lignocelulósicos, identificando el día 4 como el punto de máxima eficiencia productiva.

### Comportamiento del *Ananas comosus* (Piña):

Alcanzó su pico máximo al cuarto día con la recuperación de 10 ml de destilado primario y 5 ml tras la rectificación. Posteriormente, se observó un descenso significativo en la producción (4 ml al día 5), indicando el agotamiento de azúcares fermentables o inhibición por producto.

**Tabla 1.-** Bioetanol obtenido de las cascaras de piña.

Fermentado/día	Destilado (ml Bioetanol)	Rectificado (ml Bioetanol)	Purificación (ml Bioetanol)
1	3	1	0.75
2	4	2.5	2
3	5.5	3.5	3
<b>4</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
5	4	3	2
6	3	2	1.5

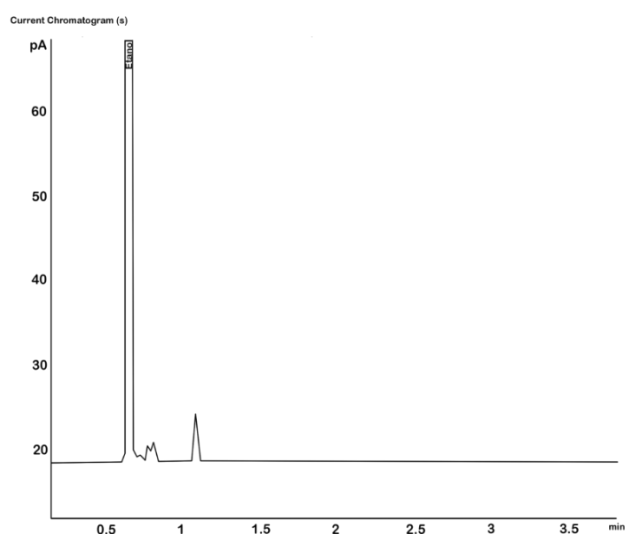
La Tabla 1 presenta el perfil cinético de la producción de bioetanol a partir de exocarpos de piña (*Ananas comosus*). El análisis temporal revela que la concentración máxima de producto se alcanza en el cuarto día de fermentación. Posterior a este punto de inflexión, se observa un descenso en el rendimiento de etanol, atribuible al agotamiento de azúcares fermentables o a la volatilización del alcohol en el medio.

**Figura 10.-** Bioetanol de piña almacenado.



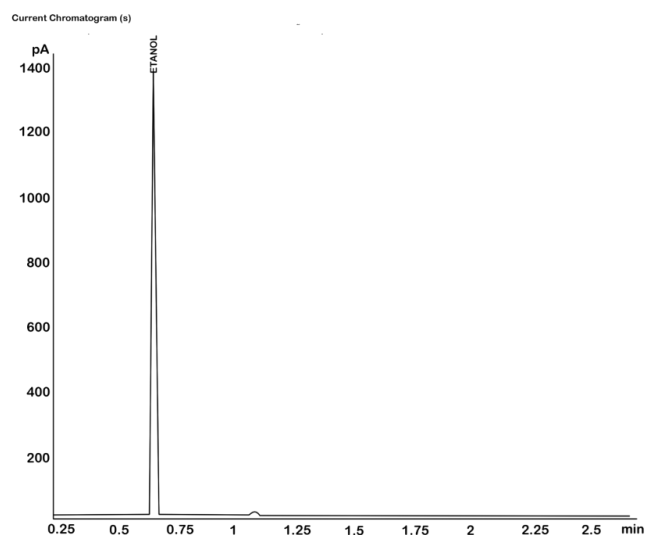
Los resultados del análisis cromatográfico se detallan en las Figuras 11 y 12. Dichos cromatogramas muestran la evolución de la pureza del bioetanol de piña (*Ananas comosus*), contrastando el producto rectificado frente al purificado. En las gráficas se puede apreciar la reducción de los picos asociados al agua y otros congéneres en la muestra final.

**Figura 11.-** Cromatografía del bioetanol rectificado de los exocarpos de piña.



En la Figura 11 se detalla el perfil composicional del destilado de piña (*Ananas comosus*). La integración de los picos reporta una pureza alcohólica del 78.38%. Adicionalmente, el análisis cualitativo confirma la presencia de agua y pequeñas cantidades de metanol; la aparición de este último es consistente con la degradación de pectinas presentes en la cáscara durante la fermentación.

**Figura 12.-** Cromatografía del bioetanol deshidratado de piña.



La Figura 12 presenta el cromatograma del bioetanol de exocarpos de piña tras la etapa de purificación. En contraste con la muestra anterior, se evidencia una disminución drástica de la señal correspondiente al agua, lo cual confirma la efectividad del agente deshidratante. El análisis cuantitativo determina que esta muestra alcanzó una pureza de bioetanol del 90.20%.

### Comportamiento del *Diospyros digyna* (Zapote Negro):

Presentó el mayor volumen de rendimiento bruto al cuarto día, obteniendo 15 ml de destilado y 8 ml de rectificado. La curva de producción mostró un crecimiento acelerado entre el día 3 y 4, seguido de una caída abrupta al día 5.

**Tabla 2.-** Bioetanol obtenido del Zapote negro.

Fermentado/día	Destilado (ml Bioetanol)	Rectificado (ml Bioetanol)	Purificación (ml Bioetanol)
1	3	2	1
2	4	3	2
3	8	5	4
<b>4</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>7</b>
5	6	4	2
6	3	1	1

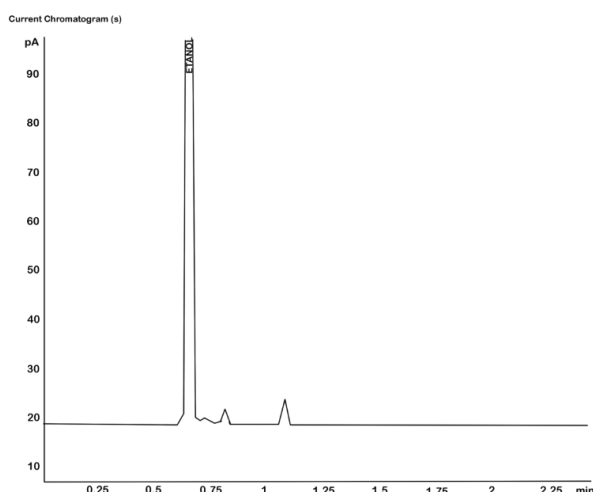
Respecto a la matriz de zapote negro, la Tabla 2 resume la evolución de la producción alcohólica. Los resultados validan nuevamente que el tiempo de reacción óptimo se sitúa en el cuarto día; posterior a este hito, los niveles de etanol en el medio comienzan a descender, fenómeno consistente con el agotamiento del sustrato o inhibición por producto.

**Figura 13.-** Bioetanol de zapote negro almacenado.



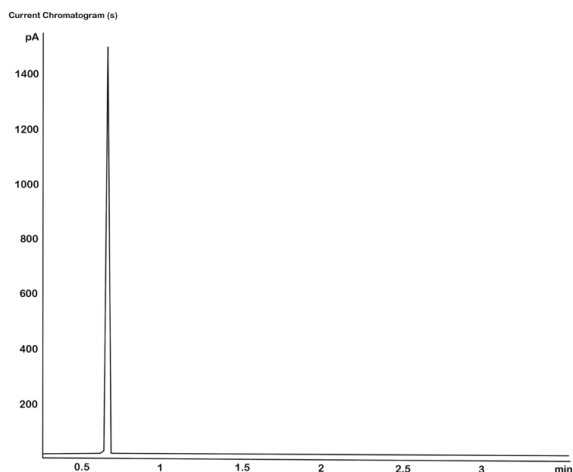
La evidencia instrumental para el caso del zapote negro se compila en las figuras 14 y 15. Dichos análisis gráficos permiten corroborar el cambio en el perfil de concentración entre la etapa de destilación simple y el proceso de deshidratación posterior.

**Figura 14.-** Cromatografía del bioetanol rectificado de zapote negro.



Respecto a la composición detallada en la Figura 14, el cromatograma denota una riqueza alcohólica del 83.64%. Si bien persisten el agua y pequeñas cantidades de metanol componentes inherentes a la destilación simple, el pico de etanol domina claramente el espectro, superando en pureza inicial a la matriz de piña previamente analizada.

**Figura 15.-** Cromatografía del bioetanol deshidratado de zapote negro.



Al analizar el perfil del producto purificado en la Figura 15, se evidencia una notable limpieza del espectro. Las impurezas volátiles como el metanol han sido removidas por completo, y el contenido hídrico se ha reducido a niveles mínimos operativos. El cálculo de áreas bajo la curva arroja una concentración definitiva del 92.38%, consolidando al zapote negro como una materia prima altamente competitiva.

Para concluir el análisis fermentativo, se presentan en la Tabla 3 los valores de producción correspondientes a los exocarpos de naranja. El comportamiento de esta biomasa cítrica se alinea con los patrones previos, validando el cuarto día como el intervalo óptimo de reacción antes del agotamiento del medio.

**Tabla 3.-** Bioetanol obtenido de los exocarpos de naranja.

<b>Fermentado/día</b>	<b>Destilado (ml Bioetanol)</b>	<b>Rectificado (ml Bioetanol)</b>	<b>Purificación (ml Bioetanol)</b>
1	2	1	1
2	3	1	1
3	5	3	2
<b>4</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>5</b>
5	3	2	2
6	1	1	1

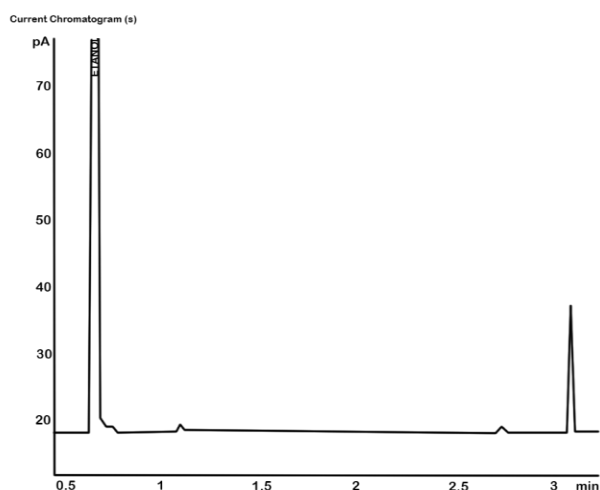
Por último, la Tabla 3 consolida los hallazgos cinéticos utilizando exocarpos de naranja (*Citrus sinensis*). Los datos corroboran el patrón identificado en las biomásas anteriores: la productividad se maximiza invariablemente a las 96 horas de proceso. Este comportamiento confirma que el cuarto día representa el punto de inflexión crítico para el sistema, tras el cual se inicia una fase de degradación o evaporación del producto.

**Figura 16.-** Bioetanol de naranja almacenado.



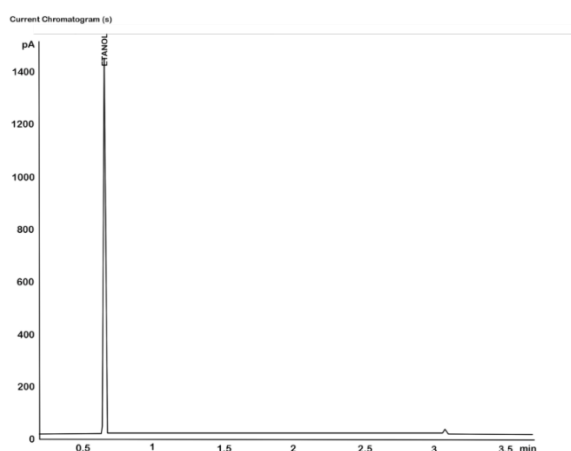
La evidencia gráfica correspondiente a los exocarpos de naranja se encuentra sistematizada en las Figuras 17 y 18. Estos cromatogramas permiten visualizar la eficacia del refinamiento, marcando las diferencias composicionales críticas entre la etapa de destilación simple y la purificación con CaO.

**Figura 17.-** Cromatografía del bioetanol rectificado de naranja.



En la Figura 17 se detalla el perfil de la matriz de *Citrus sinensis* tras la rectificación. Se observa una pureza notable del 90.44%, el valor más alto alcanzado en esta etapa comparado con las otras biomasas. Las señales de agua remanentes son características de una solución que se aproxima a la composición del azeótropo etanol-agua, punto en el cual la volatilidad de ambos componentes se iguala.

**Figura 18.-** Cromatografía del bioetanol deshidratado de naranja.



El análisis del producto purificado, ilustrado en la Figura 18, demuestra la ruptura efectiva del azeótropo. La concentración final se elevó hasta un 93.16%, superando significativamente a las otras biomasas. Este valor es crítico, ya que posiciona al destilado de naranja como el único candidato que supera con holgura el umbral de pureza requerido para su uso directo en mezclas oxigenantes de alto desempeño.

### Validación Normativa (ASTM D4806-11a).

La Tabla 4 resume la comparación final de pureza obtenida tras la deshidratación con CaO frente al estándar internacional.

**Tabla 4.** Comparativa de Pureza Final vs. Norma ASTM.

Sustrato	Pureza Final (% v/v)	Cumplimiento ASTM D4806-11a (>92.1%)
<i>C. sinensis</i> (Naranja)	93.16%	SÍ
<i>D. digyna</i> (Zapote Negro)	92.38%	SÍ
<i>A. comosus</i> (Piña)	90.20%	NO

Los resultados validan que el bioetanol producido a partir de cáscaras de naranja y zapote negro cumple con el requisito mínimo de pureza (92.1%) establecido por la norma ASTM D4806-11a. Por consiguiente, estos biocombustibles son técnicamente aptos para la formulación de mezclas oxigenantes tipo E5 y E10 en gasolinas comerciales, sin requerir modificaciones mecánicas en los motores de combustión interna actuales. El bioetanol de piña, aunque cercano, requiere una optimización adicional en la etapa de deshidratación para alcanzar el estándar comercial.

### CONCLUSIONES

La presente investigación demostró la viabilidad técnica y funcional de producir bioetanol de segunda generación (2G) mediante la valorización de residuos lignocelulósicos agroindustriales. La metodología desarrollada estableció un esquema de biorefinería eficiente, integrando una cinética de fermentación optimizada con un proceso de purificación sustentable basado en química verde. De los hallazgos obtenidos, se concluye:

**Rendimiento y Calidad de la Materia Prima:** La evaluación comparativa identificó a los exocarpos de naranja (*Citrus sinensis*) como la matriz más competente, alcanzando la mayor pureza final (93.16%) tras la deshidratación. El zapote negro (*Diospyros nigra*) se posicionó como una alternativa altamente competitiva con una pureza del 92.38% y destacando por su alto rendimiento volumétrico en la fase de destilación. En contraste, el bioetanol de piña (*Ananas comosus*), con una pureza del 90.20%, evidenció la necesidad de una mayor optimización en la etapa de separación para superar la barrera azeotrópica.

**Conformidad Normativa y Aplicación:** Se certifica que los biocombustibles derivados de naranja y zapote negro satisfacen los criterios de calidad estipulados por la norma internacional ASTM D4806-



11a (>92.1%). Esta validación confirma su aptitud técnica para formular aditivos oxigenantes en mezclas E5 y E10, garantizando su compatibilidad con el parque vehicular actual sin requerir modificaciones mecánicas en los motores de combustión interna.

**Innovación en Ingeniería de Procesos:** Se estableció que la cinética de reacción óptima para *Saccharomyces cerevisiae* (1.2 g/L) se sitúa en 96 horas (4 días). Asimismo, se validó la eficacia del óxido de calcio (CaO) biogénico, sintetizado a partir de residuos de cascarón de huevo, como un agente deshidratante selectivo y sustentable. Este material demostró capacidad para la ruptura del azeótropo agua-etanol y la remoción efectiva de impurezas como el metanol, cerrando un ciclo de economía circular.

### **Recomendaciones y Perspectivas Futuras.**

Basado en la experiencia experimental y los desafíos operativos identificados, se proponen las siguientes directrices para la reproducibilidad y el escalamiento del proceso:

**Control Riguroso de la Anaerobiosis:** Es imperativo asegurar la hermeticidad absoluta de los biorreactores. La infiltración de oxígeno atmosférico desvía el metabolismo de la levadura hacia la respiración celular (Efecto Pasteur) y favorece la proliferación de contaminantes aeróbicos (e.g., bacterias acéticas), lo cual impacta negativamente en el rendimiento alcohólico.

**Gestión del "Headspace" y Presión Interna:** Para configuraciones en reactores de vidrio o rígidos, se recomienda restringir el volumen operativo al 50-60% de la capacidad total. La generación vigorosa de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) durante la fase exponencial de fermentación incrementa drásticamente la presión interna; un espacio de cabeza (headspace) insuficiente compromete la integridad estructural del reactor y eleva el riesgo de fallas mecánicas o explosión por sobrepresión.

**Protocolos HSE (Salud, Seguridad y Medio Ambiente):** Se debe estandarizar el manejo de los gases efluentes. La purga de  $CO_2$ , al ser un gas asfixiante y desplazar el oxígeno, debe realizarse exclusivamente bajo campanas de extracción o en áreas con ventilación forzada para mitigar riesgos de hipoxia en el personal.

**Estrategias de Intensificación de Procesos:** Este estudio sienta las bases para la valorización de residuos frutícolas. Para futuras líneas de investigación, se sugiere evaluar la incorporación de una etapa de hidrólisis enzimática previa a la fermentación.



Esto permitiría despolimerizar la fracción celulósica de matrices más fibrosas (como la piña), liberando una mayor cantidad de azúcares fermentables y potencialmente incrementando la eficiencia global del proceso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abbi M. Kuhad R. Singht A. (1996). “Fermentation of xylose and rice straw hydrosylate to etanol by *Candida shehatae* NCL-3501”. *Journal of Industrial Microbiology*. Volumen 17. Páginas 20-23.
- Aiello C. Ferrer A. Ledesma A. (1996). “Effect of alkaline treatments at various temperatures on cellulase and biomass production using submerged sugarcane bagasse fermentation with *Trichoderma reesei* QM 9414”. *Bioresource Technology*. Volumen 57. Páginas 13-18.
- Álvarez C. (2009). “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico. Mercados actuales y comercio internacional”. *Mercados actuales y comercio internacional. Economía informa*. Número 359. Julio-agosto. Páginas 63-69.
- Aoyama M., Seki K. (1999). “Acid catalysed steaming for solubilization of bamboo grass xylan”. *Bioresource Technology*. Volumen 69. Páginas 91-94.
- Azhar A., Bery M., Colcord A. (1981). “Factors affecting alcohol fermentation of wood acid hydrolysate”. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*. Volumen 11. Páginas 293–300.
- Bailey B. (1996). “Performance of ethanol as transportation fuel”. *Handbook on Bioethanol*. Eds. Charles E. Wyman. Páginas 37-60.
- Budny D. y Sotero P. (2007). Brazil Institute special report: “The Global dynamics of biofuels”. Brazil Institute. Woodrow International Center for Scholars. Consultado 14-11-2025.
- Cabrera S., Gómez A., Martínez A. y Quintero R. (2000). “Biocombustibles a partir de recursos lignocelulósicos: estudio del caso, bagazo de caña en México”, Centro de Investigación en Biotecnología- UAEM, Instituto Mexicano del Petróleo, Instituto de Biotecnología-UNAM. Página 21.
- Escobar J., Lora E., Venturini O., Yáñez E., Castillo E., Almazan O. (2009). “Biofuels: Environment, technology and food security”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen 13. Páginas 1275–1287.
- Fargione, J. (2008). “Land-use change”. *Science*. Volumen 319. Páginas 1238-1240.



- Ganatsios V., Koutinas A., Bekatorou A., Kanellaki M., Nigam P. (2014). "Promotion of maltose fermentation at extremely low temperatures using a cryotolerant *Saccharomyces cerevisiae* strain immobilized on porous cellulosic material". *Enzyme and Microbial Technology*. Volumen 66. Páginas 56–59.
- Genisheva Z., Vilanova M., Mussatto S., Teixeira A., Oliveira J. (2014). "Consecutive alcoholic fermentations of white grape musts with yeasts immobilized on grape skins-Effect of biocatalyst storage and SO<sub>2</sub> concentration on wine characteristics". *LWT - Food Science and Technology*. Volumen 59. Páginas 1114-1122.
- Giovani G., Rosi L., Bertuccioli M. (2012). "Quantification and characterization of cell wall polysaccharides released by non-*Saccharomyces* yeast strains during alcoholic fermentation". *International Journal of Food Microbiology*. Volumen 160. Páginas 113–118.
- Goettemoeller J. (2007). "Sustainable ethanol: biofuels, biorefineries, cellulosic biomass; flex-fuel vehicles, and sustainable farming for energy independence". Praire Oack Publishing. Maryville, Missouri, U.S.A Páginas 42.
- González J. (2009). *Energías Renovables*. Barcelona, Editorial Reverté. Página 656.
- Hall D., Rosillo F, Williams R., Woods J (1993). "Biomass for energy: supply prospects". *Renewable energy: Source for fuels and electricity*. Earthscan, London. Páginas 593-651.
- Madigan M., Martinko J., Parker J. (2000). "Brock biology of microbiology. NJ. Prentice-Hall. Edition 9.
- Mousdale D. (2008). "Biofuels: Biotechnology, Chemistry and Sustainable Development". CRC Press U.S.A. Páginas 33-44.
- Parés R. y Juárez A. (1997). "Bioquímica de los microorganismos". Editorial Reverté S.A. Páginas 404.
- Peterson C.L. y Reece D. (1996). "Emissions characteristics of ethyl and methyl ester of rapeseed oil compared with low sulfur Diesel control fuel in a chassis dynamometer test of a pickup truck". *Transactions of the ASAE*. Volumen 39. Páginas 805–816.
- Pretorius I., du Toit M., van Rensburg P. (2003). "Designer Yeasts for the Fermentation Industry of the 21st Century". *Food Technology and Biotechnology*. Volumen 41. Páginas 135-114.



- Ryan L., Convery F., Ferreira S. (2006). "Stimulating the use of biofuels in the European Union: Implications for climate change policy". *Energi Policy*. Volumen 34. Páginas 3184-3194.
- Salinas E., Gasca V. (2009). "Los biocombustibles". Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. *El Cotidiano*. Número 157. Septiembre-Octubre. Páginas 75-82.
- Timilsina G., Shrestha A. (2011). "How much hope should we have for biofuels?". *Energy*. Volumen 36. Páginas 2055-2069.
- Vasudevan P., Sharma S., Kumar A. (2005). "Liquid fuel from biomass: an overview". *Journal of scientific and industrial research*. Volumen 64. Páginas 822-831.
- Vicente G. Martínez M. Aracil J. (2004). "Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems". *Bioresource Technology*. Volumen 92. Páginas 297-305.
- do como Zotero, Mendeley u otro.

