# Evaluation of Bioethanol as a Sustainable Alternative to Fossil Fuels Using Organic Waste

Heniel J. Hernández Meléndez[1]; Mali Boria Antonsanti[2]; Ariangelis Ortiz Negron[3]
[1,3]Polytechnic University of Puerto Rico, Puerto Rico, hernandez_153206@students.pupr.edu, aortiz@pupr.edu
[2]Polytechnic University of Puerto Rico, Puerto Rico, boria_141538@students.pupr.edu

**Resumen– La creciente dependencia de los combustibles fósiles ha contribuido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y a diversos problemas ambientales, generando la necesidad de desarrollar alternativas renovables a partir de recursos disponibles localmente. El bioetanol producido a partir de residuos agrícolas y agroindustriales representa una estrategia potencial para reducir la acumulación de residuos y, simultáneamente, recuperar el valor energético de la biomasa. En este estudio se evaluó la producción de bioetanol a partir de cáscara de piña y residuos derivados del procesamiento del café mediante hidrólisis ácida, fermentación y destilación simple. Las materias primas fueron lavadas, secadas y trituradas mecánicamente antes del tratamiento. La hidrólisis ácida se realizó utilizando ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) 0.5% a 40 °C durante 1 hora. Posteriormente, las muestras fueron neutralizadas con hidróxido de sodio (NaOH) 2 M hasta alcanzar un valor de pH en el intervalo de 4.5–5.5 y fueron centrifugadas a 10,000 rpm durante 12 minutos. Las fracciones líquidas obtenidas fueron fermentadas utilizando *Saccharomyces cerevisiae* durante 48–72 horas y posteriormente sometidas a destilación a una temperatura máxima de 80 °C. Se realizó una prueba de yodo para evaluar cualitativamente la conversión del almidón a azúcares fermentables, mientras que la concentración de alcohol fue determinada mediante un densímetro portátil Anton Paar DMA 35. Además, se utilizó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para caracterizar los productos destilados y comparar sus perfiles de absorción con un estándar comercial de etanol. La muestra derivada de piña alcanzó una concentración de alcohol de 3.8 % w/w, mientras que la muestra derivada del café alcanzó 2.4 % w/w. El análisis FTIR mostró bandas de absorción asociadas con grupos funcionales característicos de alcoholes, y la muestra de piña presentó una mayor similitud con el estándar de etanol. Los resultados demostraron el potencial de los residuos agrícolas como materia prima para la producción de bioetanol y respaldaron su valorización como recursos renovables dentro de un modelo de economía circular.**

## I. Introducción

La creciente dependencia mundial de los combustibles fósiles ha generado importantes preocupaciones ambientales relacionadas con las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica y el agotamiento progresivo de los recursos no renovables. La búsqueda de fuentes de energía alternativas y renovables se ha convertido, por tanto, en un componente importante de las estrategias dirigidas hacia la transición energética y la reducción de la dependencia de combustibles convencionales. Entre los biocombustibles disponibles, el bioetanol ha recibido considerable atención debido a que puede producirse a partir de diferentes materias primas biológicas y utilizarse como combustible o como componente de mezclas con gasolina [1], [2].

Los biocombustibles pueden clasificarse en diferentes generaciones dependiendo de la materia prima utilizada. Los biocombustibles de primera generación se producen principalmente a partir de cultivos destinados al consumo humano, como maíz, caña de azúcar y trigo. En contraste, los biocombustibles de segunda generación utilizan residuos agroindustriales, residuos animales y otras materias primas no destinadas directamente a la alimentación. Esta última categoría presenta una ventaja potencial al permitir el aprovechamiento de residuos sin depender exclusivamente de cultivos alimentarios [1], [2]. La literatura recopilada en la investigación también señala que los residuos agroindustriales constituyen materias primas de interés para el desarrollo de procesos de producción de bioetanol debido a su disponibilidad y contenido de componentes aprovechables.

Los residuos agroindustriales representan una alternativa particularmente interesante debido a que permiten integrar la producción de combustibles con estrategias de valorización de residuos. Se ha señalado el potencial económico y ambiental de producir etanol a partir de residuos agroindustriales [3], mientras que otros estudios han realizado una revisión sobre la producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas [4]. Estas investigaciones respaldan el aprovechamiento de materiales residuales como materias primas para la producción de combustibles renovables. En particular, los residuos generados por el procesamiento del café han sido estudiados como posible materia prima para la producción de bioetanol. Se ha evaluado el aprovechamiento de los polisacáridos presentes en la pulpa residual de café para la obtención de bioetanol, destacando su potencial dentro de un modelo de bioeconomía [5].

Asimismo, los residuos de frutas representan una fuente potencial de carbohidratos aprovechables. La conversión de residuos alimentarios y agrícolas en bioetanol permite transformar materiales que normalmente serían descartados en productos de valor agregado. Se ha analizado la producción de bioetanol a partir de residuos alimentarios ricos en carbohidratos, resaltando la posibilidad de integrar la valorización de residuos con la producción de combustibles renovables [6].

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La organización estructural de estos componentes dificulta el acceso directo a los carbohidratos fermentables, por lo que generalmente se requiere una etapa de pretratamiento antes de la hidrólisis y fermentación. Los métodos de pretratamiento pueden ser físicos,

químicos, fisicoquímicos o biológicos, y su efectividad depende de las características específicas de la materia prima utilizada [7], [8], [9]. Las investigaciones recopiladas también han señalado que las condiciones de pretratamiento pueden afectar significativamente la disponibilidad de azúcares y el rendimiento posterior del proceso de fermentación.

La hidrólisis ácida constituye uno de los métodos químicos utilizados para facilitar la conversión de los carbohidratos presentes en la biomasa. Durante este proceso, las condiciones ácidas promueven la ruptura de estructuras complejas y favorecen la liberación de compuestos solubles que posteriormente pueden ser utilizados por microorganismos durante la fermentación. La concentración del ácido, la temperatura y el tiempo de reacción son variables importantes debido a que una intensidad insuficiente puede limitar la liberación de azúcares, mientras que condiciones excesivamente severas pueden favorecer la degradación de los azúcares liberados [10], [9]. La literatura también ha identificado la hidrólisis ácida diluida como una estrategia utilizada para facilitar la sacarificación de residuos lignocelulósicos destinados a la producción de bioetanol.

Puerto Rico genera cantidades significativas de residuos agrícolas y agroindustriales que permanecen subutilizados a pesar de su potencial para aplicaciones energéticas. En este contexto, la cáscara de piña y los residuos derivados del café fueron seleccionados como materias primas para evaluar su potencial de conversión bioquímica a etanol. El proceso desarrollado comprendió la preparación de las materias primas, hidrólisis ácida, neutralización, centrifugación, fermentación, destilación y caracterización del producto mediante la determinación de alcohol y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

El objetivo de este estudio fue evaluar la producción de bioetanol a partir de cáscara de piña y residuos derivados del café mediante un proceso de conversión bioquímica, y comparar las concentraciones de alcohol y las características espectroscópicas de los productos obtenidos a partir de ambas materias primas.

## II. Materiales y Métodos

### *A. Preparación de las materias primas*

Se seleccionaron cáscara de piña y residuos derivados del procesamiento del café como materias primas para el proceso experimental. Inicialmente, ambas materias primas fueron lavadas con agua destilada con el propósito de remover contaminantes y material residual presente en sus superficies.

Después del lavado, el material de café y la cáscara de piña fueron sometidos a secado en un horno a 60 °C, durante aproximadamente 30 minutos y 3 días respectivamente. Posteriormente, las materias primas fueron sometidas a procesamiento mecánico para reducir el tamaño de partícula. Esta reducción se realizó con el propósito de aumentar el área de superficie para facilitar el contacto entre la biomasa y el medio de hidrólisis durante el tratamiento químico posterior.

### *B. Hidrólisis ácida*

La hidrólisis ácida fue utilizada como tratamiento químico para ambas materias primas. La biomasa previamente preparada fue tratada con una solución de ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) 0.5% durante 1 hora a 40 °C.

Las condiciones de temperatura, concentración de ácido y tiempo de reacción fueron mantenidas de acuerdo con las condiciones experimentales establecidas para el estudio. El tratamiento tuvo como propósito facilitar la conversión de estructuras de carbohidratos complejos presentes en la biomasa hacia compuestos solubles potencialmente fermentables.

El uso de un pretratamiento químico se fundamentó en la necesidad de aumentar la accesibilidad de los carbohidratos presentes en la biomasa lignocelulósica. La efectividad de este tipo de tratamiento depende de factores como la concentración del agente químico, la temperatura y el tiempo de exposición [7]. La literatura también ha establecido que la hidrólisis de materiales lignocelulósicos constituye una etapa fundamental en la conversión de biomasa hacia etanol [10].

### *C. Neutralización y centrifugación*

Una vez completada la hidrólisis, las muestras fueron enfriadas antes de realizar la neutralización. Se añadió una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 2 M hasta alcanzar un pH en el intervalo de 4.5–5.5.

El ajuste del pH se realizó con el propósito de establecer condiciones adecuadas para la posterior fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*. La selección de este intervalo permitió disminuir la acidez generada durante la hidrólisis y preparar el hidrolizado para la etapa biológica.

Después de la neutralización, las muestras fueron centrifugadas a 10,000 rpm durante 12 min. La centrifugación permitió separar los residuos sólidos remanentes de la fracción líquida que contenía los compuestos solubles producidos durante la hidrólisis. La fracción líquida recuperada fue utilizada posteriormente para la fermentación.

### *D. Prueba de yodo*

Luego de la hidrólisis ácida, se realizó una prueba cualitativa de yodo para evaluar la presencia de almidón residual. La ausencia de la coloración azul-negra característica indicó que no se detectó almidón bajo las condiciones de la prueba, respaldando la continuación del hidrolizado hacia la etapa de fermentación. Sin embargo, esta prueba no permite cuantificar la concentración de glucosa u otros azúcares fermentables producidos durante la hidrólisis.



Fig 1. Prueba de yodo.

### E. Fermentación

Las fracciones líquidas obtenidas después de la centrifugación fueron sometidas a fermentación utilizando levadura de panadería, *Saccharomyces cerevisiae*. Esta especie fue seleccionada debido a su utilización en procesos de fermentación alcohólica y su capacidad de convertir azúcares fermentables en etanol.

La fermentación se realizó durante un período de 48–72 horas. Durante esta etapa, los compuestos fermentables presentes en el hidrolizado fueron sometidos a conversión biológica, generándose etanol como uno de los principales productos de interés.

El empleo de *S. cerevisiae* es consistente con investigaciones previas sobre producción de etanol a partir de biomasa. Por ejemplo, se han evaluado diferentes cepas industriales de *Saccharomyces cerevisiae* para la producción de etanol a partir de biomasa, demostrando la relevancia de la selección de la cepa en procesos de fermentación [11].



Fig 2. Proceso de fermentación de cáscara de café y cáscara de piña.

### F. Destilación

Una vez finalizada la fermentación, se utilizaron 200 mL de hidrolizado fermentado para la recuperación del producto alcohólico. Las muestras fueron sometidas a destilación simple para separar la fracción más volátil del líquido fermentado.

La temperatura máxima utilizada durante la destilación fue de 80 °C para las muestras correspondientes a la cáscara de piña y los residuos de café. Los productos destilados fueron recolectados para su posterior determinación de concentración de alcohol y análisis mediante FTIR.

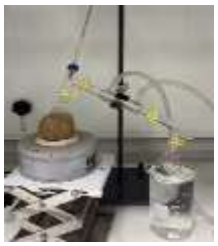


Fig 3. Montaje experimental de destilación.

### G. Determinación de la concentración de alcohol

La concentración de alcohol de los productos obtenidos fue determinada mediante un densímetro portátil Anton Paar DMA 35. Los resultados fueron expresados como porcentaje en masa (% w/w).

La muestra derivada de la cáscara de piña presentó una concentración de alcohol de 3.8% w/w, mientras que la muestra derivada del café presentó una concentración de 2.4% w/w.

Estas mediciones fueron utilizadas para comparar el comportamiento relativo de ambas materias primas bajo las condiciones experimentales evaluadas.

### H. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Se realizó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier para caracterizar químicamente los productos destilados. Los espectros obtenidos de las muestras de piña y café fueron comparados con un estándar comercial de etanol.

Los espectros fueron evaluados antes y después de remover la contribución del agua. Esta comparación fue necesaria debido a que la presencia de agua produce una banda amplia de absorción correspondiente a vibraciones O–H en la región aproximada de 3200–3400 $cm^{-1}$, lo que puede dificultar la identificación de las bandas adicionales asociadas con los productos alcohólicos.

Después de remover el agua, se pudieron distinguir con mayor claridad las bandas asociadas con grupos funcionales presentes en los productos. Se prestó especial atención a las regiones correspondientes a vibraciones C–O y O–H características de compuestos alcohólicos.

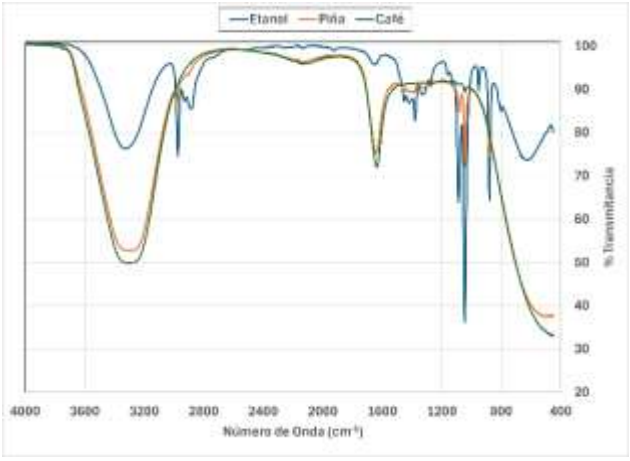



Fig 4. Comparación de los espectros FTIR del etanol control, bioetanol de cáscara de piña y bioetanol de cáscara de café

## III. Resultados y Discusión

### A. Concentración de alcohol

La producción de compuestos con contenido alcohólico fue observada para ambas materias primas evaluadas. La muestra derivada de la cáscara de piña presentó una concentración de alcohol de 3.8% w/w, mientras que la muestra derivada del café presentó una concentración de 2.4% w/w. Por lo tanto, bajo las

condiciones experimentales utilizadas, la materia prima derivada de la piña presenta un mayor potencial para la producción de alcohol.

La mayor concentración observada para la piña pudo estar relacionada con diferencias en la composición química de las materias primas, la disponibilidad de carbohidratos fermentables y la facilidad con la cual sus componentes estructurales pudieron ser afectados por el tratamiento ácido.

La composición de la biomasa constituye un factor importante en la producción de bioetanol debido a que diferentes materias primas pueden presentar diferentes proporciones de celulosa, hemicelulosa, lignina, azúcares solubles y otros componentes. Por esta razón, las condiciones de pretratamiento y conversión pueden generar resultados diferentes dependiendo del residuo utilizado [8], [9].

El resultado obtenido para el café también respaldó el potencial de los residuos derivados de esta materia prima. Se ha estudiado el aprovechamiento de los polisacáridos de la pulpa de café residual para la obtención de bioetanol, demostrando la relevancia de este tipo de residuo dentro de estrategias de bioeconomía [5].

Es importante aclarar que los valores de 3.8% w/w y 2.4% w/w corresponden a concentraciones de alcohol medidas experimentalmente, y no representan por sí mismos un rendimiento másico de etanol respecto a la cantidad inicial de biomasa. Para determinar un rendimiento de etanol sería necesario establecer un balance de masa basado en la masa inicial de materia prima, preferiblemente en base seca, y la cantidad de etanol recuperada luego de realizar una destilación del total de la muestra fermentada, lo cual no fue posible en nuestras condiciones experimentales.




Fig. 5. Análisis del contenido de bioetanol en la muestra de piña (3.8%).

*B. Evaluación de la hidrólisis mediante la prueba de yodo*

La prueba de yodo proporcionó evidencia cualitativa de la efectividad de la etapa de hidrólisis. Después del tratamiento ácido, las muestras no presentaron la coloración azul-negra característica de la presencia de almidón. Este resultado apoyó la interpretación de que el almidón detectable había sido convertido o removido durante el tratamiento y permitió continuar con la etapa de fermentación.




Fig. 6. Análisis del contenido de bioetanol en la muestra de café (2.4%).

Sin embargo, la prueba de yodo no permitió determinar cuantitativamente la concentración de azúcares fermentables generados. Por esta razón, no fue posible establecer mediante esta prueba la cantidad exacta de glucosa, fructosa u otros azúcares presentes en el hidrolizado.

La literatura indica que la severidad del pretratamiento debe controlarse cuidadosamente. Un tratamiento insuficiente puede limitar la liberación de carbohidratos, mientras que condiciones excesivamente severas pueden generar compuestos derivados de la degradación de azúcares que interfieren con la fermentación [7], [9]. La optimización de estas condiciones representa, por tanto, una oportunidad importante para mejorar el proceso desarrollado.

*C. Caracterización mediante FTIR*

El análisis FTIR proporcionó evidencia adicional de la presencia de grupos funcionales compatibles con compuestos alcohólicos en los productos obtenidos. Antes de remover la contribución del agua, los espectros presentaron una banda amplia de absorción O–H en la región aproximada de 3200–3400 $cm^{-1}$, asociada principalmente a grupos hidroxilo tanto del agua como de alcoholes.

Después de reducir la contribución del agua, las bandas relacionadas con los compuestos alcohólicos pudieron distinguirse con mayor claridad. Las muestras derivadas de la piña y café presentaron una banda alrededor de 1045 $cm^{-1}$, mientras que también se observaron bandas alrededor de 1085 $cm^{-1}$ y 3293 $cm^{-1}$ en la piña. Estas regiones fueron asociadas con vibraciones de estiramiento C–O y grupos hidroxilo, respectivamente.

La muestra derivada de la piña presentó además un perfil espectroscópico más parecido al estándar comercial de etanol y un mayor número de bandas características en la región de huella digital en comparación con la muestra de café.

La mayor similitud espectral observada para la piña fue consistente con la mayor concentración de alcohol determinada mediante el Anton Paar DMA 35. Sin embargo, la similitud entre espectros no debe interpretarse como una demostración de pureza absoluta del producto.

El FTIR permitió identificar grupos funcionales compatibles con alcoholes, pero no permitió determinar por sí solo la concentración exacta de etanol ni identificar cuantitativamente todos los compuestos presentes. Por esta razón, técnicas como cromatografía de gases (GC) o cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) serían necesarias para una caracterización más completa.

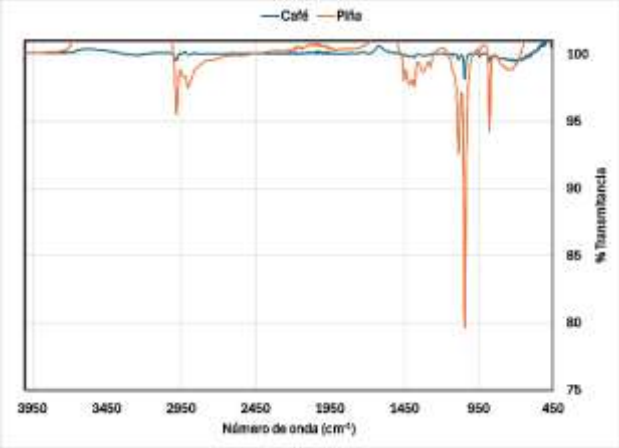



Fig 7. Comparación de los espectros FTIR de piña y café después de remover las bandas asociadas al agua

### *D. Comparación entre materias primas*

Los resultados indicaron que la cáscara de piña presentó un mejor comportamiento que los residuos derivados del café bajo las condiciones experimentales evaluadas. La muestra de piña presentó tanto una mayor concentración de alcohol como una mayor similitud con el estándar comercial de etanol mediante FTIR.

Esta diferencia pudo deberse a las características químicas y físicas de cada materia prima. La composición de los residuos lignocelulósicos puede afectar la accesibilidad de los carbohidratos y, por consiguiente, la cantidad de azúcares disponibles para la fermentación. Los procesos de pretratamiento deben, por tanto, adaptarse a las características de cada materia prima [8], [9].

La literatura ha identificado la valorización de residuos agrícolas como una estrategia con potencial ambiental y económico. Se ha señalado la importancia de los residuos agrícolas como materias primas para la producción de bioetanol [4], mientras que también se han discutido las perspectivas económicas y ecológicas de la producción de etanol a partir de residuos agroindustriales [3].

Asimismo, el desarrollo de procesos de producción a partir de residuos puede contribuir a la transición hacia sistemas de aprovechamiento más circulares, en los cuales los materiales descartados se transformen en productos de valor agregado. La literatura recopilada en la investigación ha destacado precisamente el potencial de los residuos lignocelulósicos dentro de procesos de biorrefinería y producción de biocombustibles.

En conjunto, los resultados demostraron que ambas materias primas pudieron utilizarse para producir productos con contenido alcohólico a escala de laboratorio, mientras que la piña presentó el comportamiento más favorable bajo las condiciones estudiadas.

Tabla. 1. Bandas de absorción FTIR y grupos funcionales correspondientes.

| Muestra | Frecuencia (cm-1) | Grupo funcional | Asignación vibracional |
|---|---|---|---|
| **Piña y café** | 1045 | C - O | Vibración de estiramiento C - O |
| **Piña** | 1085 | C - O | Vibración de estiramiento C - O |
| **Piña** | 3293 | O - H | Vibración de estiramiento O - H |

## IV. Conclusiones

El bioetanol fue producido a partir de cáscara de piña y residuos derivados del café mediante un proceso de laboratorio que incluyó preparación de las materias primas, hidrólisis ácida, neutralización, centrifugación, fermentación y destilación sencilla.

El procedimiento experimental empleó $H_2SO_4$ 0.5% a 40 °C durante 1 hora, seguido de neutralización con NaOH 2 M hasta un pH entre 4.5 y 5.5, centrifugación a 10,000 rpm durante 12 minutos, fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* durante 48–72 horas y destilación a una temperatura máxima de 80 °C. La recuperación del producto destilado se realizó a partir de 200 mL de hidrolizado fermentado.

La muestra derivada de la cáscara de piña presentó la mayor concentración de alcohol, con un valor de 3.8% w/w, mientras que la muestra de café presentó 2.4% w/w. La prueba de yodo proporcionó evidencia cualitativa compatible con la efectividad de la hidrólisis, mientras que el análisis FTIR identificó bandas asociadas con grupos funcionales característicos de compuestos alcohólicos.

La muestra derivada de la piña presentó una mayor similitud con el estándar comercial de etanol y un mayor número de bandas características en la región de huella digital después de reducir la contribución del agua. Estos resultados, combinados con las mediciones de concentración de alcohol, respaldaron la formación de productos con contenido de etanol a partir de ambas materias primas.

En términos generales, los resultados demostraron el potencial de la cáscara de piña y los residuos de café como materias primas alternativas para la producción de bioetanol. El proceso también permitió valorizar residuos agrícolas que de otro modo podrían ser descartados, contribuyendo a estrategias de aprovechamiento de residuos y recuperación de recursos.

No obstante, los resultados obtenidos deben considerarse como una evaluación preliminar a escala de laboratorio. La

optimización de las etapas de hidrólisis y fermentación, así como una caracterización cuantitativa más específica del producto, serían necesarias para determinar el potencial real de escalamiento del proceso.

## V. Recomendaciones

Se recomienda optimizar sistemáticamente las condiciones de hidrólisis y fermentación con el propósito de aumentar la concentración y recuperación de etanol. Entre las variables que deberían evaluarse se encuentran la concentración de ácido sulfúrico, temperatura de hidrólisis, tiempo de reacción, pH, duración de la fermentación y condiciones de inoculación. La literatura ha demostrado que los parámetros de pretratamiento tienen una influencia importante sobre la disponibilidad de carbohidratos y el desempeño posterior del proceso de producción de bioetanol [7], [9].

También se recomienda evaluar el uso de una levadura seleccionada específicamente para procesos de vinificación y fermentación alcohólica para determinar si su desempeño permite aumentar la conversión de azúcares a etanol. Esta recomendación debería estudiarse experimentalmente mediante una comparación directa entre la levadura utilizada en el presente trabajo y diferentes cepas de levadura de vino, manteniendo constantes las demás variables del proceso. La selección de la cepa constituye una variable relevante en la fermentación alcohólica, y estudios previos han evaluado diferentes cepas industriales de *S. cerevisiae* para la producción de etanol a partir de biomasa [10].

Para aumentar la concentración inicial de etanol antes de la destilación, se recomienda optimizar la concentración de azúcares fermentables en el hidrolizado y las condiciones de fermentación. Esto puede incluir la evaluación de tratamientos enzimáticos, como el uso de celulasas, para favorecer la liberación de azúcares a partir de los residuos orgánicos lignocelulósicos. Asimismo, el establecimiento de una concentración óptima de azúcares podría permitir obtener un hidrolizado con una mayor concentración inicial de etanol. Como estrategia de trabajo futuro, se podría evaluar el objetivo de alcanzar una concentración de etanol de aproximadamente 10–15 % antes de la etapa de destilación, en lugar de realizar la separación a partir de una mezcla con una concentración inicial relativamente baja.

También se recomienda mejorar la etapa de destilación mediante destilación fraccionada, incorporando entre el matraz de ebullición y el condensador una columna empacada con material adecuado, como perlas de vidrio o alambre de metal. Esta configuración permitiría múltiples ciclos de vaporización y condensación, favoreciendo la separación del etanol del agua y el retorno al matraz de los componentes de mayor punto de ebullición. Además, se recomienda mantener la temperatura del vapor cercana a 78.3–78.5 °C, considerando que el etanol hierve aproximadamente a 78.4 °C y el agua a 100 °C, para reducir el arrastre de agua y evitar la disminución de la concentración de alcohol. Finalmente, optimizar la relación de reflujo permitiría que parte del líquido condensado retornara a la columna, mejorando el contacto entre las fases líquida y vapor y, por consiguiente, la eficiencia de separación y la concentración de etanol en el destilado.

Se recomienda realizar una caracterización cuantitativa de los azúcares presentes antes y después de la fermentación, incluyendo glucosa y otros azúcares fermentables. Esta información permitiría establecer una relación cuantitativa entre la cantidad de sustrato disponible y la cantidad de alcohol producida, además de determinar si las condiciones de hidrólisis están proporcionando una cantidad suficiente de azúcares para una fermentación más eficiente.

## VI. Trabajo Futuro

Para futuras investigaciones, se recomienda incorporar cromatografía de gases (GC) o cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) para determinar con mayor precisión la concentración y pureza del etanol producido. Estas técnicas permitirían complementar las mediciones obtenidas mediante el densímetro y el análisis FTIR, proporcionando una caracterización cuantitativa más precisa del producto.

Además, se recomienda determinar el rendimiento real de etanol mediante un balance de masa, utilizando la masa inicial de materia prima, preferiblemente en base seca, la cantidad de azúcares fermentables y la masa o volumen de etanol recuperado. Esto permitiría diferenciar claramente entre concentración de alcohol, recuperación y rendimiento del proceso.

Finalmente, se recomienda evaluar otras materias primas agrícolas disponibles en Puerto Rico, así como realizar estudios comparativos de sus composiciones y comportamiento durante la hidrólisis y fermentación. El desarrollo de un proceso adaptable a diferentes residuos permitiría identificar las materias primas con mayor potencial para la producción de bioetanol y contribuiría al desarrollo de estrategias de valorización de residuos agrícolas y agroindustriales. La literatura ha destacado precisamente la necesidad de optimizar estos procesos y seleccionar materias primas apropiadas para avanzar hacia sistemas de producción de biocombustibles más eficientes [4], [2].

## Agradecimiento/Reconocimiento

Los autores agradecen al programa de investigación de la universidad por el apoyo brindado a esta investigación. Agradecemos sinceramente a nuestra mentora de investigación por su invaluable orientación, motivación y apoyo continuo a lo largo de este proyecto. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Técnico de Laboratorio Ángel López por su asistencia técnica y apoyo durante los procedimientos experimentales.

## Referencias

[1] Naik, S., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(2), 578–597. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003.

[2] Melendez, J. R. (2022). Biotecnología y gerencia aplicada en la producción de bioetanol 1G y 2G. Revista de Ciencias Sociales (Ve), XXVIII(4), 415–429.
[3] Bhatia, L., Johri, S., & Ahmad, R. (2012). An economic and ecological perspective of ethanol production from renewable agro waste: A review. AMB Express, 2(1), 65. https://doi.org/10.1186/2191-0855-2-65
[4] Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. Renewable Energy, 37, 19–27.
[5] Acevedo, M.-A., Peñaloza-Quintero, I., & Morales-Fonseca, D. (2021). Aprovechamiento de los polisacáridos de la pulpa de café residual para la obtención de bioetanol como estrategia hacia la bioeconomía. Gestión y Ambiente, 24(Supl. 3), 100–113. https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl3.99983.
[6] Panahi, H. K. S., et al. (2022). Bioethanol production from food wastes rich in carbohydrates. Bioresource Technology Reports, 17, 100960. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100960
[7] Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. Bioresource Technology, 101(13), 4851–4861. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093.\
[8] Ravindran, R., & Jaiswal, A. K. (2016). A comprehensive review on pretreatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and opportunities. Bioresource Technology, 199, 92–102
[9] Shukla, A., Kumar, D., Girdhar, M., Kumar, A., Goyal, A., Malik, T., & Mohan, A. (2023). Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: Distinct and integrated approaches. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 16*, 44. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2.
[10] Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. Bioresource Technology, 83, 1–11
[11] C. Kasavi et al., "Evaluation of industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains for ethanol production from biomass," *Biomass and Bioenergy*, vol. 45, pp. 230–238, 2012.
[12] K. Zhang et al., "Effect of diluted hydrolysate as yeast propagation medium on ethanol production," *Bioresource Technology*, vol. 271, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.080.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y LA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

Declaramos el uso de inteligencia artificial a lo largo del manuscrito con el propósito de realizar correcciones gramaticales. Además, se utilizó como apoyo para mejorar la presentación de algunas gráficas y organizar ciertas citaciones, sin modificar el contenido ni el significado de la información presentada.