



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN
CARRERA DE AGROINDUSTRIA

Trabajo de Integración Curricular
previa la obtención del Grado
Académico de Ingeniera
Agroindustrial.

Proyecto de Investigación:

**“OBTENCIÓN DE BIOETANOL A BASE DE CÁSCARA DEL RECHAZO DEL
PLÁTANO VERDE TIPO BARRAGANETE (*Musa paradisiaca*)”**

Autora:

AZANZA QUEVEDO SANDRA VANESSA

Director de Proyecto de Investigación:

ING. LOGUARD SMITH ROJAS URIBE, MSc.

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2025



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **AZANZA QUEVEDO SANDRA VANESSA**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

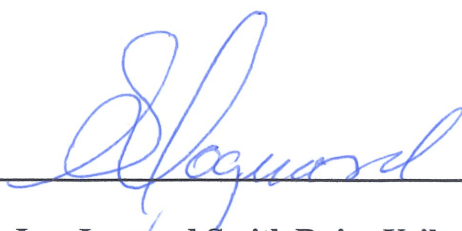
AZANZA QUEVEDO SANDRA VANESSA

C.I. 2300625593



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Loguard Smith Rojas Uribe**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que la estudiante **Azanza Quevedo Sandra Vanessa**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Obtención de bioetanol a base de cáscara del rechazo del plátano verde tipo barraganete (*musa paradisiaca*)**”, previo a la obtención del título de **Ingeniera Agroindustrial**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.



Ing. Loguard Smith Rojas Uribe, MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

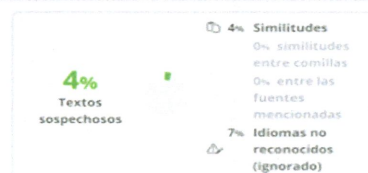


CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Loguard Smith Rojas Uribe**, mediante el presente cumpla en presentar a usted el informe del proyecto de Investigación titulado “Obtención de bioetanol a base de cáscara del rechazo del plátano verde tipo barraganete (*musa paradisiaca*)”, presentado por la estudiante **Azanza Quevedo Sandra Vanessa**, egresada de la Carrera de Agroindustria que fue revisado bajo mi dirección según la resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Industria y Producción, que se ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple el requerimiento de análisis de COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 96 % y similitud en 4 %, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes de acuerdo como lo establece el Reglamento.



OBTENCIÓN DE BIOETANOL A BASE DE CÁSCARA DEL RECHAZO DEL PLÁTANO VERDE TIPO BARRAGANETE Azanza



Nombre del documento: OBTENCIÓN DE BIOETANOL A BASE DE
CÁSCARA DEL RECHAZO DEL PLÁTANO VERDE TIPO BARRAGANETE
Azanza.pdf
ID del documento: 46e20bc20f0f51d5f3d9e69531ac4e307ad5caed
Tamaño del documento original: 1,65 MB

Depositante: LOGUARD SMITH ROJAS URIBE
Fecha de depósito: 5/5/2025
Tipo de carga: Interface
Fecha de fin de análisis: 5/5/2025

Número de palabras: 16.024
Número de caracteres: 121.964

Ing. Loguard Smith Rojas Uribe, MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN

CARRERA DE AGROINDUSTRIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Obtención de bioetanol a base de cáscara del rechazo del plátano verde tipo barraganete (*musa paradisiaca*)”

Presentado al Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Industria y Producción como requisito previo a la obtención del título de Ingeniera Agroindustrial.

Aprobado por:

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Wiston Javier Morales Rodríguez, MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Azucena Elizabeth Bernal Gutiérrez, MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Dr. Luis Alberto Egas Astudillo, PhD.

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2025

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Loguard Rojas, por su dedicación, paciencia y por estar siempre pendiente de cada detalle de mi proyecto. Su guía y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo y la culminación de este trabajo. Agradezco también a la universidad, por brindarme la oportunidad de formar parte de esta gran comunidad académica, un espacio donde no solo adquirí conocimientos, sino también valiosas experiencias y amistades que atesoraré para siempre.

Mi gratitud se extiende a todos los docentes que, con su enseñanza, inspiración y apoyo, me permitieron alcanzar este importante logro. Cada uno de ustedes dejó una huella significativa en mi formación profesional y personal. Finalmente, pero con el mayor cariño, agradezco a mis padres, Óscar Azanza y María Quevedo, por ser mi pilar constante. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su confianza en mí han sido la base de este triunfo. Este logro es también suyo, porque siempre creyeron en mí y estuvieron a mi lado en cada paso del camino.

Azanza Quevedo Sandra Vanessa

DEDICATORIA

En primer lugar, a mis padres, Óscar Azanza y
María Quevedo, cuya fortaleza, amor
incondicional y sacrificio han sido el cimiento de
mis logros. Gracias por enseñarme el valor de la
perseverancia, el esfuerzo constante y la
importancia de nunca rendirme. Este triunfo es
tanto suyo como mío, porque sin su apoyo, sus
palabras de aliento y su guía, este sueño no
habría sido posible. A una persona muy especial
en mi vida, quien ha estado a mi lado en mis
momentos más felices y también en los más
difíciles. Su confianza inquebrantable en mí, su
constante motivación cuando sentía que ya no
podía más y su capacidad de ser mi refugio en
medio de la tormenta, han sido mi mayor
fortaleza. Gracias por creer en mí incluso cuando
yo dudaba de mí mismo y por recordarme
siempre que los sueños se alcanzan con amor y
valentía.

Azanza Quevedo Sandra Vanessa

RESUMEN

La industria procesadora de musáceas en Ecuador genera grandes cantidades de residuos lignocelulósicos, cuya gestión inadecuada representa un problema ambiental. La producción de bioetanol a partir de cáscaras de plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*) surge como una alternativa para mitigar este impacto y aprovechar un recurso subutilizado. El estudio se desarrolló bajo un diseño factorial 3×2, donde se evaluaron tres tipos de hidrólisis (ácida, básica y enzimática) y dos cepas de levadura (*Saccharomyces cerevisiae* y *Saccharomyces pastorianus*), con tres réplicas por tratamiento. Se determinó que la hidrólisis enzimática fue el pretratamiento más eficiente, logrando mayores valores de sólidos solubles (10.70 °Brix) en comparación con los otros métodos. Asimismo, *S. pastorianus* mostró mejor desempeño en la fermentación, alcanzando hasta 47.67 °GL en combinación con la hidrólisis enzimática, superando significativamente a *S. cerevisiae*. Estos resultados evidencian que la selección del pretratamiento y la levadura adecuada son factores críticos para optimizar la producción de bioetanol. El análisis estadístico confirmó la influencia significativa de los factores estudiados en la conversión de biomasa en bioetanol ($p < 0.0001$), demostrando que este proceso no solo es técnicamente factible, sino que también puede contribuir a la gestión sostenible de los residuos agroindustriales. Con estos hallazgos, se resalta la importancia de continuar optimizando las condiciones del pretratamiento y fermentación para mejorar la eficiencia y viabilidad del bioetanol como una fuente de energía renovable en Ecuador.

Palabras claves: Hidrólisis enzimática, conversión lignocelulósica, fermentación alcohólica, eficiencia bioetanólica

ABSTRACT

The banana-processing industry in Ecuador produces large amounts of lignocellulosic waste, and improper disposal poses a serious environmental concern. Producing bioethanol from green Barraganete plantain (*Musa paradisiaca*) peels offers a sustainable solution by converting this underutilized biomass into a valuable resource. This study employed a 3×2 factorial design, evaluating three types of hydrolysis (acid, alkaline, and enzymatic) and two yeast strains (*Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces pastorianus*), with three replicates per treatment. Enzymatic hydrolysis was identified as the most effective pretreatment, yielding the highest soluble solids content (10.70 °Brix) compared to other methods. Additionally, *S. pastorianus* exhibited superior fermentation performance, reaching up to 47.67 °GL when paired with enzymatic hydrolysis, significantly outperforming *S. cerevisiae*. Statistical analysis confirmed the strong influence of both pretreatment and yeast strain on bioethanol yield ($p < 0.0001$), demonstrating the technical viability of this approach. These findings underscore the importance of optimizing both pretreatment and fermentation conditions to improve process efficiency and promote bioethanol as a viable renewable energy source for Ecuador.

Keywords: Enzymatic hydrolysis, lignocellulosic conversion, alcoholic fermentation, bioethanol efficiency.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO	iv
AGRADECIMIENTO.....	vi
DEDICATORIA	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
TABLA DE CONTENIDO	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
CÓDIGO DUBLÍN	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Problema de investigación.....	3
1.1.1. Planteamiento del problema	3
1.1.2. Formulación del problema.....	4
1.1.3. Sistematización del problema	4
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Justificación.....	5
CAPÍTULO II.....	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1. Marco conceptual	7
2.1.1. Biocombustibles	7
2.1.2. Biomasa.....	7
2.1.3. Bioetanol	8
2.1.4. Cascara de plátano verde.....	8
2.1.5. Técnicas biotecnológicas.....	10
2.1.6. Sacarificación enzimática.....	11

2.1.7. Componentes lignocelulósicos	12
2.1.8. Cepas microbianas	12
2.1.9. Azúcares fermentables	13
2.1.10. Rendimiento del bioetanol.....	13
2.2. Marco Referencial.....	14
CAPÍTULO III.....	17
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	17
3.1. Localización.....	18
3.1.1. Materia prima	18
3.2. Métodos de investigación.....	18
3.2.1. Investigación analítica.....	18
3.2.2. Investigación experimental.....	19
3.2.3. Investigación Descriptiva	19
3.2.4. Investigación cuantitativa.....	19
3.3. Métodos de investigación.....	19
3.3.1. Método analítico	19
3.3.2. Método de observación	19
3.3.3. Método inductivo.....	20
3.4. Fuente de recopilación de la información	20
3.5. Diseño de la investigación.....	20
3.5.1. Factores de estudio.....	21
3.5.2. Variables estudiadas.....	22
3.6. Instrumentos de investigación	22
3.6.1. Descripción del proceso de elaboración del bioetanol.....	22
3.6.2. Descripción de los rendimientos y análisis físico químicos.....	27
3.7. Tratamiento de datos.....	29
3.8. Recursos humanos y materiales.....	30
CAPÍTULO IV	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1. Resultados.....	32
4.1.1. Resultados correspondientes a los análisis físico químicos	32
4.1.2. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para sólidos solubles obtenidos de los procesos de hidrólisis	34
4.1.3. Resultados estadísticos de los azúcares fermentables.....	36
4.1.4. Resultados de los grados alcohólicos y etanol obtenido	38

4.1.5. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para grados alcohólicos obtenidos	39
4.1.6. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para la cantidad de etanol obtenido	41
4.1.7. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para la eficiencia del proceso de fermentación	43
CAPÍTULO V	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1. Conclusiones.....	47
5.2. Recomendaciones	48
CAPÍTULO VI	49
BIBLIOGRAFÍA	49
CAPÍTULO VII	56
ANEXOS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de estudio para el diseño	21
Tabla 2. Tratamientos a realizar en el diseño experimental	21
Tabla 3. ANOVA para el diseño experimental AxB.....	22
Tabla 4. Recursos humanos y materiales para la realización del proyecto de investigación .	30
Tabla 5. Sólidos solubles, densidad, azúcares, etanol teórico por método y réplica	32
Tabla 6. Cuadro de Análisis de la Varianza (sólidos solubles)	34
Tabla 7. Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)	34
Tabla 8. Comparaciones múltiples (Tukey HSD).....	35
Tabla 9. ANOVA para Azúcares Fermentables (g)	36
Tabla 10. Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)	36
Tabla 11. Grados Alcohólicos y cantidad de etanol obtenidos.....	38
Tabla 12. Cuadro de Análisis de la Varianza (grados alcohólicos)	39
Tabla 13. Prueba de Tukey para Comparación de Medias (grados alcohólicos).....	39
Tabla 14. Cuadro de análisis de varianza	41
Tabla 15. Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)	41
Tabla 16. Cuadro de análisis de varianza	43
Tabla 17. Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo – Campus “La María”	18
Figura 2. Diagrama de flujo de elaboración de bioetanol	25
Figura 3. Balance de materia de la elaboración de bioetanol	26
Figura 4. Medias por tratamiento.....	34
Figura 5. Medias por tratamiento.....	37
Figura 6. Medias por tratamiento y grupos según Tuckey ($\alpha = 0.05$).....	39
Figura 7. Medias por tratamientos	42
Figura 8. Gráfico de Medias y Grupos de Tukey – Eficiencia Fermentativa (%)	44
Figura 9. Materia prima (Cáscara de plátano barraganete)	57
Figura 10. Troceado y pelado de la cáscara	57
Figura 11. Cáscara deshidratada y pesada.....	57
Figura 12. Molienda de cáscaras deshidratada	57
Figura 13. Toma de la muestra para el análisis	58
Figura 14. Preparación de soluciones	58
Figura 15. Autoclavado de muestras (hidrólisis)	58
Figura 16. Homogeneización de hidrólisis enzimática	58
Figura 17. Pérdida de pH.....	59
Figura 18. Medición de pH.....	59
Figura 19. Centrifugación de muestras	59
Figura 20. Muestra centrifugada.....	59
Figura 21. Medición de brix	60
Figura 22. Medición de grados alcohólicos.....	60
Figura 23. Fermentación de muestras	60
Figura 24. Muestras fermentando en incubadora a 30 °C	60
Figura 25. Preparación para el proceso de destilación.....	61
Figura 26. Proceso de destilación fraccionada	61

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Recepción y preparación	57
Anexo 2. Deshidratación y molienda	57
Anexo 3. Preparación de la muestra	58
Anexo 4. Inicio de la hidrólisis.....	58
Anexo 5. Determinación de pH	59
Anexo 6. Centrifugación	59
Anexo 7. Mediciones correspondientes	60
Anexo 8. Fermentación	60
Anexo 9. Destilación.....	61

CÓDIGO DUBLÍN

Título:	Obtención de bioetanol a base de cáscara del rechazo del plátano verde tipo barraganete (<i>musa paradisiaca</i>)			
Autor:	Azanza Quevedo Sandra Vanessa			
Palabras clave:	Hidrólisis enzimática	Conversión lignocelulósica	Fermentación alcohólica	Eficiencia bioetanólica
Fecha de publicación:	Mayo, 2025			
Editorial:	Quevedo - UTEQ "La María", 2025			
Resumen:	La industria procesadora de musáceas en Ecuador genera grandes cantidades de residuos lignocelulósicos, cuya gestión inadecuada representa un problema ambiental. La producción de bioetanol a partir de cáscaras de plátano verde tipo Barraganete (<i>Musa paradisiaca</i>) surge como una alternativa para mitigar este impacto y aprovechar un recurso subutilizado. El estudio se desarrolló bajo un diseño factorial 3×2, donde se evaluaron tres tipos de hidrólisis (ácida, básica y enzimática) y dos cepas de levadura (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Saccharomyces pastorianus</i>), con tres réplicas por tratamiento. Se determinó que la hidrólisis enzimática fue el pretratamiento más eficiente, logrando mayores valores de sólidos solubles (10.70 °Brix) en comparación con los otros métodos. Asimismo, <i>S. pastorianus</i> mostró mejor desempeño en la fermentación, alcanzando hasta 47.67 °GL en combinación con la hidrólisis enzimática, superando significativamente a <i>S. cerevisiae</i>. Estos resultados evidencian que la selección del pretratamiento y la levadura adecuada son factores críticos para optimizar la producción de bioetanol. El análisis estadístico confirmó la influencia significativa de los factores estudiados en la conversión de biomasa en bioetanol ($p < 0.0001$), demostrando que este proceso no solo es técnicamente factible, sino que también puede contribuir a la gestión sostenible de los residuos agroindustriales. Con estos hallazgos, se resalta la importancia de continuar optimizando las condiciones del pretratamiento y fermentación para mejorar la eficiencia y viabilidad del bioetanol como una fuente de energía renovable en Ecuador.			
Abstract:	The banana-processing industry in Ecuador produces large amounts of lignocellulosic waste, and improper disposal poses a serious environmental concern. Producing bioethanol from green Barraganete plantain (<i>Musa paradisiaca</i>) peels offers a sustainable solution by converting this underutilized biomass into a valuable resource. This study employed a 3×2 factorial design, evaluating three types of hydrolysis (acid, alkaline, and enzymatic) and two yeast strains (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> and <i>Saccharomyces pastorianus</i>), with three replicates per treatment. Enzymatic hydrolysis was identified as the most effective pretreatment, yielding the highest soluble solids content (10.70 °Brix) compared to other methods. Additionally, <i>S. pastorianus</i> exhibited superior fermentation performance, reaching up to 47.67 °GL when paired with enzymatic hydrolysis, significantly outperforming <i>S. cerevisiae</i>. Statistical analysis confirmed the strong influence of both pretreatment and yeast strain on bioethanol yield ($p < 0.0001$), demonstrating the technical viability of this approach. These findings underscore the importance of optimizing both pretreatment and fermentation conditions to improve process efficiency and promote bioethanol as a viable renewable energy source for Ecuador.			
Descripción	78 hojas: dimensiones 29 x 21 cm + CD ROM 6162			
URI:				

INTRODUCCIÓN

La producción de bioetanol en Ecuador ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsada por políticas gubernamentales que fomentan el uso de energías renovables y la diversificación de la matriz energética. Ecuador, con su abundante producción agrícola y diversidad biológica, posee un potencial considerable para la generación de biocombustibles, destacándose especialmente en la producción de bioetanol (Macias, Pérez, & Torres, 2022). Este biocombustible se considera una alternativa viable a los combustibles fósiles debido a su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir al desarrollo económico sostenible del país (Montero de la Cruz, 2017).

El bioetanol es un biocombustible obtenido a través de la fermentación de azúcares presentes en diversas fuentes como la caña de azúcar, el maíz, el trigo, el arroz, y también en residuos agrícolas, forestales y orgánicos urbanos (Hernández, 2016). Este biocombustible, utilizado de forma pura o mezclado con gasolina, se ha consolidado como uno de los más importantes en la actualidad. Sin embargo, la dependencia de materias primas alimenticias encarece su producción y genera conflictos al competir directamente con la oferta de alimentos destinados al consumo humano y animal (Aburto, Martínez, & Murrieta, 2008). Para enfrentar este desafío, una solución innovadora es el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos, como la cáscara descartada del plátano verde, lo que representa una alternativa prometedora para la producción sostenible de bioetanol.

Las musáceas, particularmente el banano y el plátano, son cultivos de gran importancia económica y social en el país, posicionándolo como uno de los principales exportadores mundiales de estos productos. Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, el país produce más de 6 millones de toneladas de banano al año, generando una considerable cantidad de residuos en forma de rechazo, que incluye cáscaras, tallos y hojas (Elbehri, y otros, 2015).

El objetivo de este proyecto es evaluar la viabilidad técnica de producir bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos de musáceas de rechazo en especial del plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*). Explorando el potencial de estos residuos como materia prima para la producción de biocombustibles, con un proceso eficiente que convierta dichos residuos en bioetanol de manera sostenible y económica. Esto contribuirá a la reducción de desechos agrícolas y al desarrollo de fuentes de energía renovable en Ecuador.

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

En Ecuador, la producción de musáceas, como el plátano y la banana, es fundamental para la economía nacional. Sin embargo, las grandes empresas que procesan estos productos, como las dedicadas a la fabricación de chips de plátano, generan una cantidad significativa de desperdicios (INIAP, 2021). Estos desechos, principalmente cáscaras y otros residuos lignocelulósicos, representan un desafío ambiental considerable debido a su acumulación y manejo inadecuado.

La creciente necesidad de encontrar fuentes alternativas de energía se vuelve más apremiante a medida que los recursos de combustibles fósiles se vuelven más costosos. En este contexto, el bioetanol producido a partir de residuos lignocelulósicos de musáceas, como las cáscaras de plátano, se presenta como una opción prometedora. Estos residuos contienen una gran cantidad de biomasa que podría ser utilizada para producir biocombustibles, reduciendo así el impacto ambiental y aprovechando un recurso infrautilizado.

Diagnóstico

En Ecuador, actualmente la producción de bioetanol ha experimentado un notable crecimiento impulsado por políticas orientadas a fomentar el uso de energías renovables. No obstante, el país enfrenta retos significativos en la gestión de residuos agrícolas, especialmente los provenientes de cultivos de musáceas como el plátano tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*). Estas actividades generan grandes volúmenes de residuos lignocelulósicos que, de no ser manejados de forma adecuada, pueden derivar en serios problemas ambientales.

Pronóstico

La falta de aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos de la cáscara del plátano podría intensificar los problemas ambientales derivados de su acumulación y manejo ineficiente, incrementando la generación de desechos agroindustriales sin una alternativa viable para su valorización. Además, la dependencia de fuentes de energía convencionales seguiría predominando, limitando el desarrollo de biocombustibles sostenibles como el bioetanol. La ausencia de innovación en el uso de estas materias primas no convencionales restringiría el avance tecnológico en el sector agroindustrial, reduciendo las oportunidades de optimización productiva y de generación de beneficios económicos y ambientales a largo plazo.

1.1.2. Formulación del problema

¿Será viable elaborar bioetanol a partir de los residuos de la cáscara del rechazo del plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*), utilizando técnicas biotecnológicas para aprovechar estos desechos agroindustriales y fomentar la producción de biocombustibles renovables?

1.1.3. Sistematización del problema

¿Será posible optimizar los procesos de pretratamiento y sacarificación enzimática para convertir eficientemente los componentes lignocelulósicos de la cáscara del plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*) en azúcares fermentables?

¿Qué cepas microbianas serán más eficientes para la fermentación de azúcares derivados de los residuos de la cáscara del plátano en la producción de bioetanol?

¿Cuál será la eficiencia del proceso de producción de bioetanol a partir de los rendimientos de etanol obtenido y los grados alcohólicos durante la fermentación?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Elaborar bioetanol a partir de los residuos de la cáscara del rechazo del plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*), utilizando técnicas biotecnológicas para aprovechar estos residuos agroindustriales y fomentar la producción de biocombustibles renovables

1.2.2. Objetivos Específicos

- Optimizar los procesos de pretratamiento y sacarificación enzimática para convertir eficientemente los componentes lignocelulósicos de la cáscara del plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*) en azúcares fermentables.
- Establecer las cepas microbianas más eficientes (*Saccharomyces cerevisiae* y *Saccharomyces pastorianus*) para la fermentación de los azúcares liberados y la producción de bioetanol.
- Evaluar la eficiencia del proceso de producción de bioetanol a partir de los rendimientos de etanol obtenido y los grados alcohólicos durante la fermentación.

1.3. Justificación

La creciente preocupación mundial por la sostenibilidad y la protección del medio ambiente ha impulsado una reevaluación de las fuentes de energía tradicionales. En este contexto, los biocombustibles se posicionan como una alternativa más sostenible y respetuosa con el entorno. Según (Gracia, 2021), Ecuador ha experimentado una transformación significativa en el uso de energías renovables, alcanzando un 85% de generación energética a partir de estas fuentes, lo que evidencia su compromiso con el desarrollo de alternativas energéticas sostenibles.

Sin embargo, el éxito de los biocombustibles depende en gran medida de las materias primas empleadas para su producción (Ramos, Carrillo, Cedeño, & Ramos, 2023). Este proyecto aborda el desafío de aprovechar los residuos lignocelulósicos del plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*), una fuente abundante de biomasa que actualmente se desaprovecha o gestiona inadecuadamente. Estos residuos contienen celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes esenciales que pueden transformarse en bioetanol, un biocombustible renovable y ambientalmente amigable. El llevar a cabo esta investigación no solo contribuiría a reducir el impacto ambiental asociado con los desechos de musáceas, sino que también ofrecería una fuente de energía renovable, apoyando la sostenibilidad económica y ambiental del país.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Biocombustibles

A finales del siglo XIX comenzó la era del petróleo con la explotación de yacimientos en Pennsylvania, Estados Unidos, lo que marcó su uso inicial para iluminación y calefacción. Durante este período, conocido como la época del petróleo barato, esta materia prima fue indispensable. Sin embargo, según (Cabrera, Gómez, Martínez, & Quintero, 2000), las crisis energéticas de los años setenta impulsaron regulaciones enfocadas en economizar combustible, aumentar la eficiencia de los motores de combustión interna y controlar las emisiones contaminantes, marcando el inicio de una búsqueda por alternativas al petróleo. Posteriormente, como señala (Sosa, 2006), el avance tecnológico y las preocupaciones ambientales han generado una tendencia hacia la disminución del consumo de petróleo y su eventual sustitución.

Los combustibles más utilizados a nivel mundial, como la gasolina y el diésel, provienen del petróleo, un recurso no renovable que genera una alta emisión de gases contaminantes al ser quemado. En respuesta a este problema, a lo largo de los años se han desarrollado nuevos combustibles basados en recursos renovables, entre ellos los biocombustibles obtenidos de aceites vegetales (biodiésel) y los derivados de biomasa (bioetanol). Los biocombustibles están formados por alcoholes, éteres, ésteres y otros compuestos químicos, obtenidos a partir de biomasa. Esta biomasa incluye plantas herbáceas y leñosas, residuos provenientes de la agricultura y la actividad forestal, así como una amplia variedad de desechos industriales, entre ellos los generados por la industria alimentaria (Abdullah, y otros, 2015).

2.1.2. Biomasa

La biomasa comprende un conjunto de materiales orgánicos y se considera una fuente de energía renovable, basada en el uso de materia orgánica generada por procesos biológicos recientes o de los productos derivados de ella. También incluye materiales como los residuos orgánicos presentes en aguas residuales, lodos de depuración y fracciones orgánicas de residuos sólidos. La energía contenida en la biomasa proviene, en última instancia, de la energía solar capturada por las plantas durante el proceso de fotosíntesis (Arellano, 2021).

2.1.3. Bioetanol

El bioetanol es un biocombustible líquido renovable producido a partir de la fermentación de azúcares y almidones presentes en materiales orgánicos como cultivos agrícolas (por ejemplo, caña de azúcar, maíz, trigo) y residuos lignocelulósicos (tallos, cáscaras, madera, entre otros) (Sigüencia, Delgado, Posso, & Sánchez, 2020). Se utiliza principalmente como un sustituto o complemento de la gasolina en motores de combustión interna y es considerado más amigable con el medio ambiente debido a que su combustión genera menos emisiones contaminantes en comparación con los combustibles fósiles. Además, el bioetanol contribuye a la economía circular al aprovechar residuos agrícolas y forestales como materia prima (Solarte, y otros, 2019).

2.1.3.1. El bioetanol en Ecuador

En Ecuador, diversos estudios han explorado la producción de bioetanol utilizando diferentes tipos de biomasa. (García, Machimura, Matsui, & Miyauchi, 2014), evaluaron el potencial de generación de bioetanol a partir de residuos agrícolas como el arroz, el banano y la caña de azúcar, empleando un modelo predictivo para ubicar plantas de producción en función del potencial energético regional. (Prado & Cervantes, 2017) investigaron las variables clave que influyen en el cultivo de caña de azúcar para la producción de bioetanol, concluyendo que el área sembrada es el factor más determinante para la eficiencia del cultivo. Por otro lado, (Guerrero & Muñoz, 2018) aplicaron un análisis de ciclo de vida para evaluar la sostenibilidad ambiental y la capacidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero, obteniendo resultados positivos. Además, se han explorado especies no convencionales, como la paja de páramo (*Stipa ichu*), como fuente primaria para la producción de bioetanol, con resultados alentadores (Albarracín, Jaramillo, & Albuja, 2015)

2.1.4. Cascara de plátano verde

El plátano es una planta herbácea monocotiledónea perteneciente a la familia *Musaceae*. Originario del sudeste asiático, sus variedades se dividen según su composición genómica en *Musa cavendish* (bananos) y *Musa paradisiaca* (plátanos) (Gibert, y otros, 2010). Actualmente, el plátano se cultiva en al menos 107 países, alcanzando una producción global superior a las 76 millones de toneladas métricas (Olumba, 2014). Es considerado el cuarto cultivo más importante a nivel mundial debido a su relevancia en la dieta básica, su alto volumen de

producción, y su impacto económico como producto de exportación, generando empleo e ingresos en las regiones tropicales y subtropicales.

De cada racimo cosechado, solo entre el 20 % y 30 % de la biomasa se utiliza, dejando un 70 % a 80 % sin aprovechar. Este material sobrante incluye el tronco con sus hojas, el brote floral, el raquis y la cáscara, que representa entre el 35 % y 40 % del plátano. Este residuo es potencialmente útil para fabricar productos de valor agregado como almidón (Melo-Sabogal, Torres, Serna, & Torres, 2018), abono orgánico, alimento para animales, harina para pastas y productos de panificación, pectinas empleadas en la industria alimentaria, y snacks procesados.

La cáscara del plátano está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, cuya proporción varía según el origen de la materia prima (Chávez, 2021). Además, es una fuente importante de celulosa y se ha evaluado como materia prima para generación de energía debido a su alto poder calorífico (16,12 MJ/kg) y un contenido moderado de cenizas (9,92 % base seca), lo que la hace competitiva frente a otras fuentes biomásicas (Rojas, Rodríguez, & Montoya, 2019).

2.1.4.1. Composición nutricional de la cascara de plátano verde

La cáscara de banano está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, aunque su proporción varía según el origen del material (Monsalve, Medina, & Ruiz, 2006). Este residuo contiene fibras vegetales que se clasifican en dos tipos: soluble e insoluble, cada una con beneficios específicos para la salud. La fibra soluble contribuye a equilibrar los niveles de colesterol en sangre, prevenir el cáncer de colon, regular el tránsito intestinal y reducir la glucosa elevada en la sangre (Gómez, Cos Blanco, & Iglesias, 2002)

En contraste, la fibra insoluble, formada por celulosa, lignina y algunas hemicelulosas, es crucial para mejorar el tránsito intestinal. La celulosa, en particular, tiene un efecto laxante más potente que la fibra soluble, siendo especialmente beneficiosa para combatir el estreñimiento (Gómez, Cos Blanco, & Iglesias, 2002). Debido a estas propiedades, los remanentes de banano representan una fuente valiosa de fibra vegetal para el consumo humano, con un gran potencial para su aprovechamiento en productos alimenticios funcionales.

2.1.5. Técnicas biotecnológicas

La biotecnología utiliza un conjunto de técnicas que permiten modificar organismos vivos, transformar materiales de origen orgánico o aprovechar procesos biológicos. Sus aplicaciones más comunes se encuentran en sectores como la industria, especialmente en la agroalimentación, la salud y la protección del medioambiente. Actualmente, la integración de la ciencia y la tecnología en el ámbito alimentario busca mejorar la calidad de los productos, aumentar su productividad, optimizar sus propiedades saludables, como en el caso de los probióticos, y desarrollar alimentos con un menor impacto ambiental (Infinitia Industrial Consulting , 2022).

El crecimiento poblacional a nivel mundial ha llevado a un aumento significativo en la demanda de alimentos, lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras. Entre estas, el uso de microorganismos para producir alimentos, aditivos y biomasa microbiana ha abierto nuevas posibilidades, permitiendo la creación de sabores, texturas y aromas únicos, así como el descubrimiento de nuevos productos alimenticios (Ostos, Rosas, & González, 2019).

Desde la década de 1970, la industria alimentaria ha incorporado técnicas biotecnológicas, empleando microorganismos genéticamente modificados, enzimas, colorantes y otros compuestos para mejorar las características organolépticas, las propiedades nutricionales y la productividad de los alimentos, respondiendo así a las crecientes necesidades de la población global (Ostos, Rosas, & González, 2019).

La producción de compuestos químicos mediante procesos metabólicos microbianos ofrece una alternativa sostenible para reducir la dependencia de los combustibles fósiles en la generación de energía. Este enfoque no solo promueve un modelo energético más respetuoso con el medio ambiente, sino que también fomenta el desarrollo de tecnologías renovables, posicionando a los microorganismos como aliados clave en la transición hacia fuentes de energía más limpias (Ostos, Rosas, & González, 2019).

Se estima que, en el futuro, al menos el 25 % de la bioenergía global podría provenir del biogás. Investigaciones actuales buscan optimizar el proceso de metanogénesis mediante técnicas avanzadas como la secuenciación de próxima generación (NGS), que permiten comprender en profundidad la estructura y dinámica de las comunidades microbianas implicadas (Ennouri, Miladi, Díaz, Solera, & Hamdi, 2016). Además, los aislamientos microbianos obtenidos a

través de estos estudios representan una prometedora fuente de innovación, con el potencial de generar nuevos productos y servicios que expandan las aplicaciones de la biotecnología en diversas industrias (Boada, Sánchez, & Wen, 2018).

2.1.6. Sacarificación enzimática

En una biorrefinería que utiliza materiales lignocelulósicos como materia prima, donde los azúcares actúan como intermediarios clave, es fundamental descomponer la estructura del material inicial para extraer los azúcares presentes en la celulosa y la hemicelulosa. Por ello, se requiere implementar un sistema de pretratamiento previo al proceso de conversión (Conde, Jiménez, & Halwagi, 2011).

El objetivo principal de las tecnologías de pretratamiento es incrementar la accesibilidad de las enzimas a la biomasa y mejorar los rendimientos de azúcares fermentables. Para lograrlo, es necesario modificar la estructura del material lignocelulósico mediante pretratamientos específicos. La selección de la tecnología más adecuada depende de la identificación de los factores estructurales que limitan el proceso. Entre estos factores críticos se encuentran: (1) la superficie específica del material, (2) el índice de cristalinidad de la celulosa, y (3) el grado de polimerización (Badaraco & Veintimilla, 2019).

2.1.6.1. Pre-tratamientos

- **Pretratamiento físico:** El principal objetivo del pretratamiento físico es reducir la cristalinidad, el tamaño de las partículas y el grado de polimerización de la biomasa. Esto se logra mediante métodos mecánicos que alteran su estructura, facilitando la hidrólisis enzimática. Este enfoque no requiere el uso de reactivos químicos o biológicos y permite aumentar la superficie de celulosa disponible para el proceso (Akhtar, Gupta, Goyal, & Goyal, 2015).
- **Pretratamiento químico:** Los ácidos orgánicos, como el oxálico, acetilsalicílico y salicílico, se utilizan como catalizadores en este método. También se emplean mezclas de disolventes orgánicos o acuosos con ácidos inorgánicos como HCl o H₂SO₄ para romper los enlaces de lignina y hemicelulosa. Sin embargo, los ácidos concentrados son menos favorables debido a su naturaleza corrosiva y la necesidad de su recuperación para mantener la viabilidad económica del proceso (Song, Wi, Kim, & Bae, 2016).

- **Pretratamiento biológico:** Este enfoque emplea microorganismos, como hongos, capaces de degradar la lignina y producir enzimas que actúan sobre la hemicelulosa y lignina de la biomasa. Es un método amigable con el medio ambiente y energéticamente eficiente, ya que se realiza a bajas temperaturas y sin el uso de productos químicos (Sindhu, Binod, & Pandey, 2015).

2.1.7. Componentes lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos ocupan un lugar destacado en la búsqueda de soluciones sostenibles debido a su abundante disponibilidad y a la diversidad de fuentes agroindustriales que los generan. Estos subproductos se producen en grandes cantidades como residuos de actividades agrícolas, forestales e industriales, lo que los convierte en una materia prima prometedora para desarrollar tecnologías innovadoras y sostenibles (Jara, y otros, 2022).

En un contexto global marcado por el progresivo agotamiento de los recursos petrolíferos, surge la necesidad urgente de encontrar alternativas basadas en recursos renovables. La biomasa lignocelulósica representa una opción estratégica, ya que permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles al tiempo que promueve el aprovechamiento de residuos agroindustriales. Según (Bardales, Cabos, León, & Jara, 2020), su uso en tecnologías avanzadas no solo contribuye a mitigar el impacto ambiental, sino que también abre nuevas oportunidades en la generación de biocombustibles, materiales y productos químicos de valor agregado, posicionándose como un pilar fundamental para la transición hacia un modelo energético más sostenible.

2.1.8. Cepas microbianas

2.1.8.1. *Saccharomyces cerevisiae*

Saccharomyces cerevisiae (*S. cerevisiae*) es un hongo unicelular cuyo genoma nuclear consta de 12.068 kilobases (kb) organizadas en 16 cromosomas (Offeau, Barrell, & Bussey, 1996). Este genoma, completamente secuenciado, contiene alrededor de 6000 genes, de los cuales se estima que 5570 son codificadores de proteínas. A lo largo de la historia, *S. cerevisiae* ha desempeñado un papel fundamental en la civilización humana gracias a su amplio uso en la fermentación de alimentos y bebidas, lo que le otorga un gran valor comercial. La fermentación puede llevarse a cabo mediante el desarrollo espontáneo de microflora presente en la materia

prima o a través de la adición de cultivos de levadura pura, dependiendo del proceso y el producto deseado (Parapouli, Vasileiadis, Afendra, & Hatziloukas, 2020).

2.1.8.2. *Saccharomyces pastorianus*

Saccharomyces pastorianus es una levadura de fermentación baja que se caracteriza por acumular espuma en el fondo del mosto durante el proceso. Este tipo de levadura tiene la capacidad de fermentar una mayor cantidad de azúcares, lo que da lugar a un sabor más fresco, típico de las cervezas tipo lager. Como hongo unicelular, *S. pastorianus* se reproduce generando células hijas a través de procesos como la gemación o la fisión binaria. Su hábitat natural se encuentra en ambientes húmedos con abundancia de nutrientes, particularmente azúcares, y requiere aminoácidos para su desarrollo óptimo (Dunn & Sherlock, 2008).

2.1.9. Azúcares fermentables

El término fermentable se refiere a un grupo de azúcares que son susceptibles a la fermentación, entre los principales se encuentran: la glucosa, la fructosa y la maltosa, este parámetro puede servir como un indicador del proceso de hidrólisis, y también como indicador de la fermentación, ya que en ocasiones no es consumido por completo, e indica la tolerancia de las cepas de levadura a una concentración de bioetanol. Su presencia en materias primas renovables, como frutas, vegetales y granos, los hace fundamentales para diversas industrias, donde permiten obtener productos de valor agregado de manera sostenible y eficiente (Guaraca, 2023).

2.1.10. Rendimiento del bioetanol

La determinación del rendimiento en bioetanol evalúa la eficiencia de conversión de una materia prima en etanol mediante fermentación. Este proceso implica pretratar la biomasa para liberar azúcares fermentables, como celulosa y hemicelulosa, que son convertidos en etanol por microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae*. El rendimiento se calcula como el porcentaje de etanol obtenido respecto a los azúcares iniciales disponibles, utilizando técnicas analíticas como cromatografía de gases o densimetría para medir la producción de etanol. Factores como la composición de la materia prima, la eficiencia del pretratamiento, las condiciones del proceso y el desempeño de los microorganismos influyen directamente en el resultado (Llangari, 2018).

2.2. Marco Referencial

(Arellano, 2021), logró producir bioetanol a partir de residuos sólidos urbanos del mercado de abasto de la Municipalidad Distrital de Huacho mediante hidrólisis ácida, utilizando diferentes concentraciones de ácido sulfúrico. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de fermentación, ajustando de manera óptima las concentraciones de levadura aplicadas a las muestras. Finalmente, se cuantificó el bioetanol obtenido para realizar su caracterización fisicoquímica. Los resultados mostraron que la pureza del alcohol obtenido estuvo en un rango de 10° a 30°. El proceso partió de 200 gramos de materia orgánica y utilizó concentraciones de ácido sulfúrico de 3, 5 y 7 M, sometidas a una temperatura de 90 °C durante un tiempo de hidrólisis de 2 a 3 días. La proporción de levadura empleada fue del 4 % y 8 %, con un tiempo de fermentación de 7 a 12 días.

(Segura, y otros, 2020), estudiaron un método para extraer celulosa del bagazo de piña, obteniendo glucosa a través de hidrólisis ácida del bagazo y de la celulosa extraída. La glucosa se neutralizó a un pH de 5.0, y posteriormente se llevó a cabo la fermentación utilizando *Saccharomyces cerevisiae* en un biorreactor tipo Batch con turbinas, manteniendo una temperatura constante de 30 °C. Durante el proceso de fermentación y posterior destilación, se lograron obtener 630 g de etanol con un 40 % de pureza. Sin embargo, el rendimiento estuvo por debajo del teórico o estequiométrico, lo que se atribuye a la incapacidad de *S. cerevisiae* para convertir completamente los azúcares en etanol, posiblemente debido a la oxidación parcial del etanol a compuestos como ácido acético. Además, el bajo grado de pureza del etanol se asoció con la eficiencia limitada del método de separación empleado, que fue la destilación simple.

En la investigación de (Llenque, Díaz, Torres, & Segura, 2020) sobre la producción de bioetanol a partir de cáscaras de *Citrus reticulata* (mandarina), *Passiflora edulis* (maracuyá) y hojas de *Eucalyptus globulus* (eucalipto), se recolectaron los residuos vegetales en bolsas de polietileno, se rotularon y trasladaron al laboratorio. Allí fueron lavados, desinfectados, secados y molidos. A 1 kg de material molido se le añadió 4 L de HCl al 1.0 M, calentándolo a 100 °C durante 5 horas. Posteriormente, se filtró y se ajustó el pH a 4.5 utilizando NaOH al 1.0 M. El medio de producción consistió en 2.2 L con 14° Brix, suplementado y fermentado con *Saccharomyces cerevisiae* MIT-L51 (100 ml/L de hidrolizado) a temperatura ambiente (23-25 °C) durante 7 días en reposo. La mezcla fermentada fue destilada a 78 °C por 3 horas.

Los rendimientos promedio obtenidos fueron de 3.8 ± 0.2 % (v/v) para las cáscaras de mandarina, 4.2 ± 0.1 % (v/v) para las de maracuyá, y 4.7 ± 0.1 % (v/v) para las hojas de eucalipto, con un grado alcohólico del 80 %. El análisis de varianza (95 % de confianza) mostró diferencias significativas entre los rendimientos obtenidos ($p < 0.05$). Según el test de Tukey, cada promedio fue significativamente distinto, confirmando que el rendimiento varía según el tipo de residuo vegetal empleado. Estos resultados sugieren que los residuos evaluados tienen potencial para la producción de bioetanol a gran escala bajo condiciones similares a las del ensayo, destacándose como una opción viable para el aprovechamiento de biomasa residual.

Las observaciones de (Zamora, Prado, Capataz, & Barrera, 2014) en las demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales, analizaron diversas fuentes de materia prima para la producción de bioetanol, destacando tanto su potencial como sus limitaciones. En la producción de bioetanol a partir de hidrolizados de almidones, evaluaron el potencial de carbohidratos más complejos para la producción de bioetanol, implementando pretratamientos químicos para adaptarlos al proceso. La producción a partir de tubérculos, como papa, camote y malanga, mostró resultados similares a los obtenidos con jugos; sin embargo, debido a los menores rendimientos agrícolas de estos cultivos, su potencial quedó rezagado frente a la caña de azúcar. Específicamente, los rendimientos fueron un 23 % inferiores para la papa, 40 % para el camote y 90 % para la malanga. Estos tubérculos presentan características contrastantes: mientras la papa y el camote son cultivos tradicionales con un conocimiento agrícola bien establecido y alta productividad, la malanga, al ser de reciente introducción, enfrenta desafíos asociados a su manejo agrícola incipiente y baja productividad en el campo.

En cuanto a la producción de bioetanol a partir de jugos frutales y cinéticas de crecimiento, se observó una relación inversa entre la disminución de los carbohidratos solubles y el incremento de biomasa y producción de etanol durante las primeras 24 horas de fermentación. Este comportamiento demuestra cómo la levadura consume los carbohidratos solubles para producir etanol y generar biomasa celular. Sin embargo, al prolongar el proceso más allá de las 24 horas, se evidenció una disminución en la eficiencia del cultivo, a pesar de que aún quedaban carbohidratos disponibles. Este estancamiento en el crecimiento de la levadura y la producción de etanol se atribuyó al efecto inhibitorio del propio etanol sobre el cultivo, lo que resalta la necesidad de optimizar los tiempos de fermentación para maximizar la productividad.

(Badaraco & Veintimilla, 2019) estudiaron, la cinética de bioconversión de la cáscara de banano maduro en bioetanol mediante procesos de sacarificación y fermentación alcohólica, con el objetivo de aprovechar residuos orgánicos, en este caso, la cáscara de banano, como una alternativa frente a la escasez de fuentes de energía no renovables. La caracterización inicial de los componentes lignocelulósicos de la cáscara se realizó mediante análisis termogravimétrico, determinando un contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa del 21.12 ± 0.24 %, 19.33 ± 0.28 % y 11.43 ± 0.39 %, respectivamente.

La producción de azúcares reductores durante el proceso aerobio se cuantificó utilizando el método del ácido dinitrosalicílico (DNS) mediante espectrofotometría UV-Visible a una longitud de onda de 540 nm. Para la hidrólisis enzimática, se emplearon tres tratamientos con distintas cantidades de inóculo: 30 $\mu\text{L/g}$ (D1), 60 $\mu\text{L/g}$ y 90 $\mu\text{L/g}$ de sustrato procesado. El mejor rendimiento se obtuvo con el tratamiento D1 a las 4 horas de hidrólisis, alcanzando una concentración de 4750 ppm de azúcares reductores. Posteriormente, para la fermentación alcohólica, se inactivó la enzima mediante autoclave a 121 °C durante 15 minutos. La fermentación se llevó a cabo en un biorreactor cerrado de color ámbar durante 96 horas, utilizando *Saccharomyces cerevisiae* previamente activada a 37 °C con un 10 % de sacarosa durante 48 horas. La levadura activada se añadió en una proporción de 1 mL por cada 1000 mL de hidrolizado. El bioetanol obtenido fue cuantificado mediante cromatografía de gases, registrando un tiempo de retención de 3 minutos y un área de 993976.9 $\mu\text{V}\cdot\text{s}$. Los resultados finales mostraron 11050 ppm de azúcares reductores (11.05 ± 0.44 g/L) y 7609 ppm de etanol (7.6 ± 0.17 g/L), lo que confirma el potencial de la cáscara de banano como materia prima para la producción de biocombustibles.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de Bromatología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicado en el Campus "La María", en la provincia de Los Ríos, Ecuador, específicamente en el sector situado en el kilómetro 7½ de la vía Quevedo-Mocache, al suroeste del corporativo Oriental, a una latitud de $-1,080109^{\circ}$ o $1^{\circ} 4' 48''$ S y una longitud de $-79,501362^{\circ}$ o $79^{\circ} 30' 4''$ W.

Figura 1. Ubicación geográfica de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo – Campus “La María”



Elaborado: (Google Maps, 2025).

3.1.1. Materia prima

La materia prima de esta investigación serán las cáscaras del rechazo de musáceas verdes tipo barraganete, recolectadas en chifleras.

3.2. Métodos de investigación

3.2.1. Investigación analítica

Esta investigación permitió evaluar los procesos involucrados en la conversión de residuos orgánicos en bioetanol, centrándose en el pretratamiento, la hidrólisis enzimática y la fermentación. Este enfoque fue crucial para identificar los factores que influyen en la eficiencia del proceso, proporcionando datos valiosos para optimizar la producción de biocombustibles

renovables y promoviendo su viabilidad como alternativa sostenible frente a las fuentes de energía no renovables.

3.2.2. *Investigación experimental*

La investigación experimental permitió manipular y controlar variables específicas para observar los efectos directos en los procesos de conversión de residuos orgánicos en bioetanol. Este enfoque fue esencial para validar hipótesis relacionadas con el rendimiento y la eficiencia de las técnicas empleadas, como el pretratamiento químico y la fermentación alcohólica.

3.2.3. *Investigación Descriptiva*

Se centró en caracterizar las propiedades de la biomasa utilizada, como su composición lignocelulósica y la concentración de azúcares reductores. Este método proporcionó una visión detallada de las características físicas y químicas del material, sirviendo como base para planificar y ajustar los procedimientos experimentales.

3.2.4. *Investigación cuantitativa*

Por medio de ella se logró analizar y medir con precisión los resultados obtenidos, como el contenido de etanol, la eficiencia de conversión y los rendimientos en azúcares. Este enfoque estadístico aseguró la validez y confiabilidad de los datos, facilitando comparaciones y conclusiones objetivas sobre el proceso estudiado.

3.3. Métodos de investigación

3.3.1. *Método analítico*

Este método permitió desglosar los procesos de conversión de residuos en bioetanol en etapas clave, como el pretratamiento, la hidrólisis enzimática y la fermentación. Su aplicación facilitó la identificación de variables críticas y la relación entre los componentes que influyen en la eficiencia del sistema.

3.3.2. *Método de observación*

A través de la observación directa, se registraron cambios relevantes durante cada fase experimental, como la transformación de los azúcares reductores y la producción de etanol. Este enfoque aseguró un análisis detallado y preciso de los fenómenos ocurridos durante el proceso.

3.3.3. Método inductivo

Con este método, se generalizaron los hallazgos obtenidos en los experimentos hacia conclusiones más amplias, aplicables a contextos similares en la producción de bioetanol. Los resultados específicos sirvieron para formular hipótesis y establecer principios relacionados con el aprovechamiento de residuos agroindustriales.

3.4. Fuente de recopilación de la información

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de materiales académicos y técnicos, incluyendo artículos científicos, libros especializados, informes previos y normativas relevantes. La recopilación de información se realizó utilizando bases de datos como ProQuest, IEEE Xplore, Elsevier y Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. Además, se realizaron reuniones periódicas con el asesor de tesis para evaluar los datos obtenidos y realizar un análisis crítico de los resultados.

3.5. Diseño de la investigación

En este estudio, se empleó un arreglo factorial 3×2 , para evaluar los efectos de diferentes tipos de pretratamiento y tipos de levadura en la producción de bioetanol a partir de cáscaras de plátano verde tipo Barraganete (*Musa paradisiaca*). Los factores evaluados fueron: tipo de pretratamiento (con tres niveles: ácido diluido, alcalino y enzimático) y tipo de levadura (con dos niveles: *Saccharomyces cerevisiae* y *Saccharomyces pastorianus*). Este diseño factorial permitió evaluar no solo los efectos principales de cada factor por separado, sino también la posible interacción entre los tipos de pretratamiento y las levaduras utilizadas. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia estadística de los factores y su interacción sobre las variables de respuesta (°Brix y grados alcohólicos). En los casos donde se identifican diferencias significativas ($p < 0.05$), se aplicó la prueba de comparación de medios de Tukey HSD para discriminar entre tratamientos.

3.5.1. Factores de estudio

Tabla 1.

Factores de estudio para el diseño

Factores de estudio	Simbología	Descripción
Factor A: Tipo de Pretratamiento	a ₀	Ácido (H ₂ SO ₄ 2 %)
	a ₁	Alcalino (NaOH 2 %)
	a ₂	Enzimático
Factor B: Tipo de Levadura	b ₀	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
	b ₁	<i>Saccharomyces pastorianus</i>

Elaborado: Autora

Tabla 2.

Tratamientos a realizar en el diseño experimental

Tratamiento	Pretratamiento	Levadura	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
T1	Ácido (H ₂ SO ₄ 2 %)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	T1R1	T1R2	T1R3
T2	Ácido (H ₂ SO ₄ 2 %)	<i>Saccharomyces pastorianus</i>	T2R1	T2R2	T2R3
T3	Alcalino (NaOH 2 %)	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	T3R1	T3R2	T3R3
T4	Alcalino (NaOH 2 %)	<i>Saccharomyces pastorianus</i>	T4R1	T4R2	T4R3
T5	Enzimático	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	T5R1	T5R2	T5R3
T6	Enzimático	<i>Saccharomyces pastorianus</i>	T6R1	T6R2	T6R3

Elaborado: Autora

Tabla 3.*ANOVA para el diseño experimental AxB*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Razón de varianza
Tratamientos	SCT	$(t - 1)$ $(6 - 1) = 5$	$CMT = SCT / (t - 1)$	CMT / CME
Factor A	SCF_A	$(f - 1)$ $(3 - 1) = 2$	$CMF_A = SCF_A / (f - 1)$	CMF_A / CME
Factor B	SCF_B	$(f - 1)$ $(2 - 1) = 1$	$CMF_B = SCF_B / (f - 1)$	CMF_B / CME
Factor AxB	SCF_{AB}	$(f_a - 1)(f_b - 1)$ $(3 - 1)(2 - 1) = 2$	$CMF_{AB} / (f_a - 1)(f_b - 1)$	CMF_{AB} / CME
Error	SCE	$t(r - 1)$ $6(3 - 1) = 12$	$CME = SCE / (t - 1)(r - 1)$	-
Total	SCT	$(t * r) - 1$ $(6 * 3) - 1 = 17$		

Elaborado: Autora**3.5.2. Variables estudiadas**

- Rendimiento de bioetanol
- pH
- Densidad
- Azúcares fermentables (g/g biomasa)
- Etanol teórico (g)
- Eficiencia de fermentación (%)
- Grados alcohólicos

3.6. Instrumentos de investigación**3.6.1. Descripción del proceso de elaboración del bioetanol**

- **Preparación de la materia prima:** Para el desarrollo experimental, se recolectaron y procesaron cáscaras de plátano descartadas. Se pelaron 50 plátanos y se picaron en fragmentos de aproximadamente 2 mm de tamaño, obteniendo un total de 2730 g de cáscara picada. Posteriormente, la muestra se sometió a un proceso de deshidratación en un horno a 65 °C durante 72 horas, reduciendo el peso total a 434 g de cáscara deshidratada, la cual se utilizó en los procesos de hidrólisis.

- **Hidrólisis (Conversión de la biomasa en azúcares fermentables):** Para romper la estructura lignocelulósica de la biomasa y liberar los azúcares fermentables, se implementaron tres métodos de hidrólisis: ácida, básica y enzimática.
- **Hidrólisis ácida:** Se pesaron 100 g de cáscara deshidratada, se autoclavaron junto con 500 mL de agua destilada a 15 psi durante 30 minutos. Luego de enfriada la muestra se añadieron 500 mL de ácido sulfúrico ajustando la concentración del mismo al 2 % (v/v). Posteriormente se mantuvo bajo calentamiento por unas 4 horas a una temperatura de ebullición de la solución. Terminado el tiempo se dejó enfriar y se ajustó el pH a 7 empleando una solución de hidróxido de sodio al 1.0 M. A continuación, el hidrolizado se centrifugó para separar los sólidos del líquido. El filtrado obtenido presentó un °Brix de 7.8 (R1), 7.3 (R2) y 7.1 (R3), evidenciando la liberación efectiva de azúcares solubles durante el proceso, lo cual es consistente con lo mencionado en la literatura (Tewari et al., 1986).
- **Hidrólisis básica:** Se repitió el procedimiento anterior, pero utilizando 200 g de cáscara deshidratada y 500 mL de hidróxido de sodio al 2 %. Posteriormente, el pH se ajustó a 7 con una solución ácida y se centrifugó la mezcla. El °Brix obtenido en los filtrados fue de 5 (R1), 4.4 (R2) y 8.6 (R3). Metodología modificada de Tewari et al (1986).
- **Hidrólisis enzimática:** Se utilizaron 134 g de cáscara deshidratada, mezclados con 1000 mL de agua destilada, y se autoclavaron. Luego, se ajustó el pH de la solución en un rango de 6.0 y 6.5 antes de agregar 15 mL de la enzima alfa-amilasa e incubar la mezcla a 80 °C con agitación continua, durante una hora. Posteriormente, el pH se ajustó entre 4.5 y 5.5 y se añadieron 27 g de la enzima pectinasa, y se incubó con agitación continua a 50 °C durante dos horas. El ajuste se hizo con una solución de ácido sulfúrico al 2 % en las muestras con pH superiores al rango de trabajo de la enzima y con una solución de hidróxido de sodio 0.1 M para aquellas muestras con pH por debajo del rango de trabajo de la enzima (esto es para el primer paso de la hidrólisis enzimática) ya para el segundo paso con la otra enzima se ajustó el pH empleando una solución de ácido sulfúrico al 2 %. La mezcla se centrifugó, obteniendo un filtrado con un °Brix de 10.1 (R1), 11.9 (R2) y 10.1 (R3). Metodología modificada de Oberoi et al. (2011).
- **Fermentación (conversión de los azúcares en etanol):** El mosto obtenido en cada tipo de hidrólisis fue dividido en dos muestras de 500 mL, utilizando *Saccharomyces cerevisiae* y *Saccharomyces pastorianus* como cepas fermentadoras. El pH se ajustó a

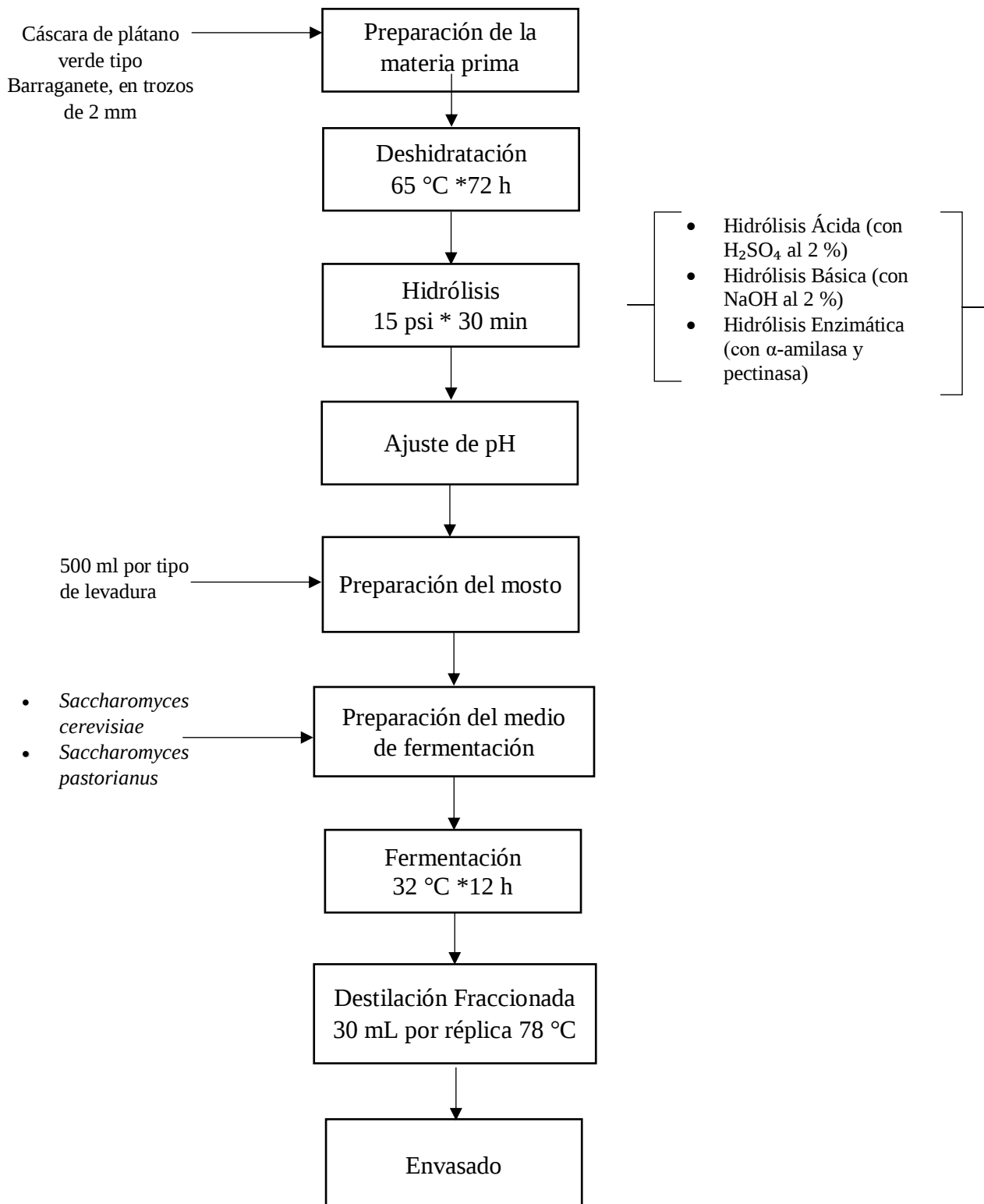
5.0, utilizando ácido acético al 5 % v/v, para los mostos ácidos y básicos, y con solución diluida de hidróxido de sodio en el caso del mosto enzimático. La preparación de las dos cepas de levadura se realizó con 0.5 g de levadura seca activa, las cuales fueron hidratadas en 50 mL de agua estéril en un rango de temperatura de 35-40°C con 2.5 g de azúcar, dejándola reposar 10-15 minutos. Luego, se añadió 0.25 g del nutriente Fermaid K y se inoculó en el mosto. El proceso de fermentación duró 6 días, manteniendo una temperatura inicial de 32 °C con agitación ligera cada 12 horas. Posteriormente, la temperatura se redujo gradualmente a 15 °C para la fase de maduración, permitiendo el desarrollo óptimo de los microorganismos hasta alcanzar niveles adecuados de etanol. Metodología adaptada de Singh et al. (2014).

- **Destilación Fraccionada (separación del bioetanol):** Finalizada la fermentación, se realizó una destilación fraccionada, obteniendo 30 mL de bioetanol por réplica. Este volumen representa la fase más volátil del destilado, lo que permite separar y concentrar el etanol generado durante la fermentación.
- **Envasado:** El bioetanol obtenido fue cuidadosamente transferido a recipientes de vidrio previamente esterilizados para garantizar la pureza del producto. Estos recipientes fueron sellados herméticamente para evitar la evaporación o contaminación del etanol, asegurando su almacenamiento seguro y facilitando su posterior uso o análisis.

3.6.1.1. Diagrama de flujo del proceso de elaboración del bioetanol a partir de cáscara de plátano

Figura 2.

Diagrama de flujo de elaboración de bioetanol

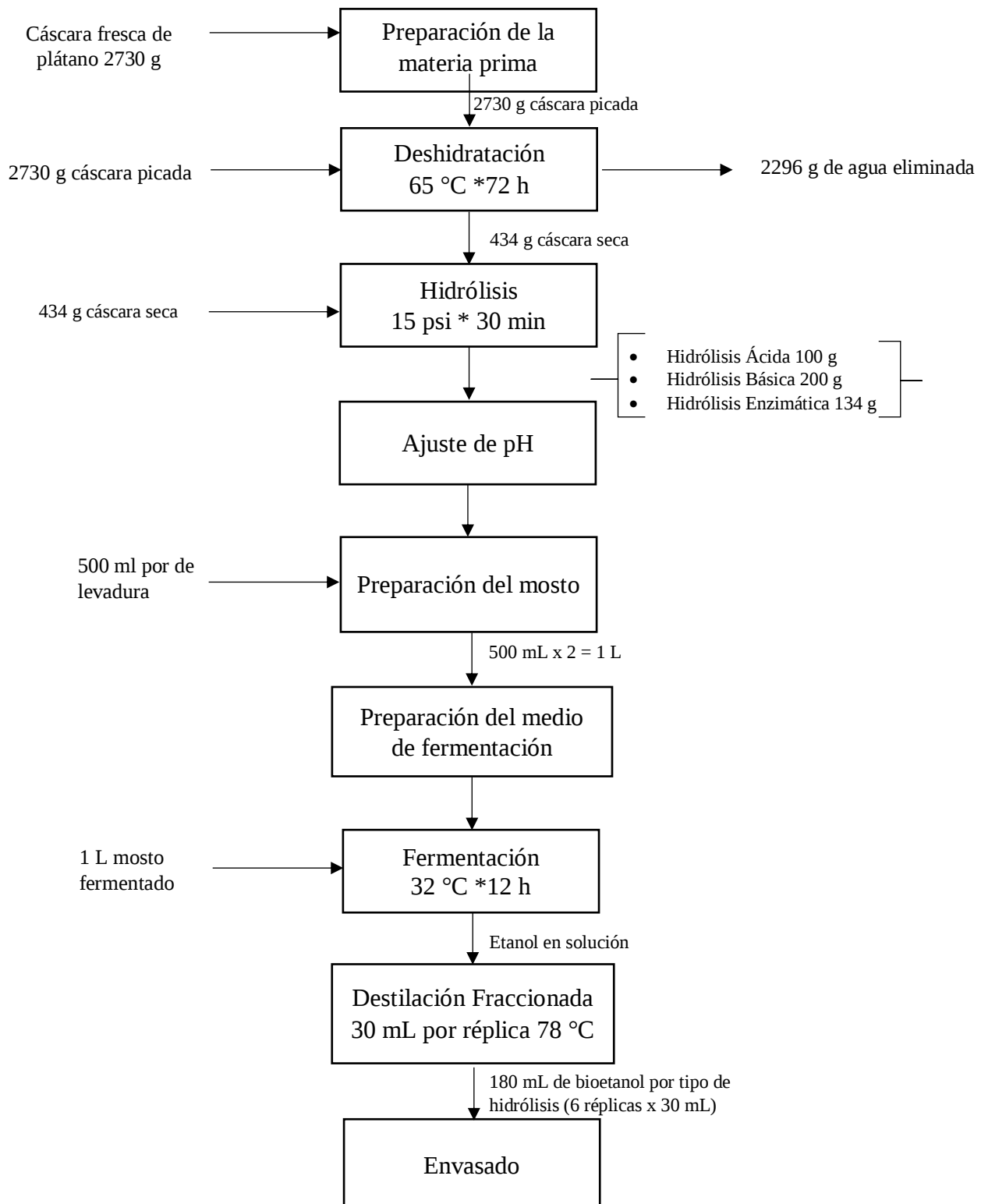


Elaborado: Autora

3.6.1.2. Balance de materia del proceso de elaboración del bioetanol a partir de cáscara de plátano

Figura 3.

Balance de materia de la elaboración de bioetanol



Elaborado: Autor

3.6.2. Descripción de los rendimientos y análisis físico químicos

- **Rendimiento de bioetanol**

Se determinó comparando la cantidad real de etanol obtenida tras la destilación con la cantidad teórica máxima estimada a partir de los azúcares fermentables disponibles. Para ello, se asumió la conversión teórica de que 1 gramo de glucosa genera un máximo de 0.51 gramos de etanol, según lo establecido por (Rabi, Kumar, & Krushna, 2022). La cantidad experimental de bioetanol obtenida en gramos se dividió entre la cantidad teórica máxima de etanol calculada y se multiplicó por 100 para obtener el rendimiento en porcentaje.

- **pH**

El pH del mosto se midió directamente durante el proceso de fermentación, ajustándose a las necesidades específicas de cada tipo de hidrólisis y levadura utilizada. Dado que el pH influye en la actividad enzimática y en la viabilidad de las levaduras, se realizó un monitoreo constante para asegurar que las condiciones fueran óptimas para cada etapa del proceso. Este tipo de metodología es comúnmente conocida como "monitoreo de pH en tiempo real" y se ajusta a las condiciones específicas de cada tratamiento, permitiendo optimizar la conversión de azúcares en etanol y garantizar una fermentación eficiente.

- **Densidad**

Se determinó la densidad del bioetanol mediante el uso de un picnómetro de 25 mL siguiendo la metodología descrita por la AOAC (2000). Primero, se pesó el picnómetro vacío y seco en una balanza analítica con una precisión de 0.0001 g. Luego, se llenó el picnómetro con el bioetanol previamente destilado y enfriado a una temperatura de 20 °C, y se volvió a pesar. Posteriormente, se repitió el procedimiento utilizando agua destilada a la misma temperatura como referencia. Finalmente, la densidad se calculó dividiendo la masa del bioetanol entre el volumen exacto del picnómetro, ajustado a la temperatura de referencia. Esta técnica permitió obtener un valor de densidad confiable y reproducible para la muestra de bioetanol analizada (AOAC, 2000).

- **Azúcares fermentables (g/g biomasa)**

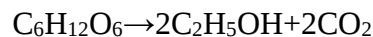
La cantidad de azúcares fermentables (g/g biomasa) se determinó aplicando la conversión de sólidos solubles medidos en °Brix, considerando que los °Brix representan gramos de sólidos solubles totales por cada 100 mL de muestra. Para ello, se utilizó la fórmula:

$$Azúcares (g) = \left(\frac{°Brix}{100} * Volumen(mL) * densidad \right)$$

Posteriormente, este valor se dividió entre la cantidad de biomasa inicial utilizada en el pretratamiento (g de cáscara deshidratada) para expresar los azúcares fermentables por gramo de biomasa procesada. Esta metodología es una práctica común en estudios de fermentación y aprovechamiento de biomasa, como lo describen (Bailey & Ollis, 1986).

- **Etanol teórico (g/)**

Esto se realizó considerando la conversión estequiométrica clásica de azúcares a etanol, donde 1 gramo de glucosa genera aproximadamente 0.51 gramos de etanol, siguiendo la ecuación de la fermentación alcohólica descrita por (Shuler & Kargi, 2017). La cantidad de azúcares fermentables obtenida experimentalmente fue multiplicada por este factor (0.51) para estimar el máximo de etanol que podría producirse bajo condiciones ideales. Este cálculo permitió establecer una base para comparar el rendimiento experimental de bioetanol frente al valor teórico máximo posible.



- **Eficiencia de Fermentación (%)**

La eficiencia de fermentación (%) se calculó dividiendo la cantidad de bioetanol obtenido experimentalmente (g) entre el etanol teórico estimado (g), basado en la conversión estequiométrica de los azúcares fermentables disponibles. Posteriormente, este valor se multiplicó por 100 para expresar el resultado en porcentaje, siguiendo la metodología propuesta por (Stanbury, Whitaker, & Hall, 2017).

$$Eficiencia (\%) = \frac{Etanol\ obtenido(g)}{Etanol\ teórico (g)} * 100$$

- **Grados alcohólicos**

Los grados alcohólicos (% v/v) se determinaron siguiendo el procedimiento establecido en la NTE INEN 340:2016 para "Bebidas alcohólicas - Determinación de grados alcohólicos volumétricos". El destilado obtenido se llevó a una temperatura de referencia de 20 °C. Luego, se vertió en una probeta aforada de 100 mL y se introdujo cuidadosamente un alcoholímetro con escala ajustada para lectura a 20 °C. Posteriormente, se esperó la estabilización de la lectura y se registró el valor observado.

3.7. Tratamiento de datos

En este estudio, se evaluaron tres tipos de hidrólisis: ácida, básica y enzimática, con el objetivo de determinar cuál de estos métodos permite una mejor conversión de los componentes lignocelulósicos de la cáscara del plátano verde tipo Barraganete en azúcares fermentables. Además, se analizaron dos cepas de levadura, *Saccharomyces cerevisiae* y *Saccharomyces pastorianus*, para evaluar su eficiencia en la fermentación de los azúcares liberados y su impacto en la producción de bioetanol.

El diseño experimental seguido fue un diseño factorial 3×2, en el que se combinaron los tres tipos de hidrólisis con las dos cepas de levadura, resultando en seis tratamientos diferentes, cada uno con tres réplicas, lo que permitió garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos. Las variables de respuesta consideradas fueron los grados Brix (°Bx), que indican la cantidad de azúcares solubles obtenidos tras cada proceso de hidrólisis, y posteriormente, los grados alcohólicos (°GL), los cuales fueron medidos tras la fermentación para determinar el contenido de etanol producido en cada tratamiento. Este enfoque permitió una evaluación integral del rendimiento de cada método y su impacto en la eficiencia del proceso de producción de bioetanol.

3.8. Recursos humanos y materiales

Tabla 4.

Recursos humanos y materiales para la realización del proyecto de investigación

Recursos humanos	
Tesista: Azanza Quevedo Sandra Vanessa	
Director: Ing. Loguard Smith Rojas	
Materia Prima	Reactivos
- Cascara de plátano verde tipo Barraganete (<i>Musa paradisiaca</i>) del rechazo	- Ácido Diluido (H_2SO_4 o HCl) - Alcalino ($NaOH$ o $Ca(OH)_2$) - Enzimas Celulolíticas y Hemicelulolíticas - Levaduras (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Saccharomyces pastorianus</i>)
Equipos	Materiales
- Sala de pruebas - Refrigerador - Balanza - Matraz Kjeldahl - Microscopio - Calculadora - Controlador de temperatura - Placas de estiramiento	- Platos o tazas limpias - Fork (tenedor) - Vasos de precipitados - Pipetas - Cápsula de porcelana - Placas petri - Marcadores de medición - Moldes
Elaborado: Autora	

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados correspondientes a los análisis físico químicos

Tabla 5.

Sólidos solubles, densidad, azúcares, etanol teórico por método y réplica

Tratamiento	°Brix	Densidad (g/mL)	Azúcares (g)	Etanol Teórico (g)
Hidrólisis Ácida	7.8	1.031	40.21	20.51
Hidrólisis Ácida	7.3	1.028	37.52	19.14
Hidrólisis Ácida	7.1	1.027	36.46	18.59
Hidrólisis Básica	5	1.016	25.40	12.95
Hidrólisis Básica	4.4	1.013	22.29	11.37
Hidrólisis Básica	8.6	1.036	44.55	22.72
Hidrólisis Enzimática	10.1	1.048	52.92	26.99
Hidrólisis Enzimática	11.9	1.059	63.01	32.14
Hidrólisis Enzimática	10.1	1.047	52.87	26.97

Elaborado: Autora

Análisis

La hidrólisis enzimática generó las mayores concentraciones de azúcares fermentables, con valores que variaron entre 52.87 g y 63.01 g, asociadas a °Brix superiores (10.1 a 11.9) y densidades mayores a 1.04 g/mL. En segundo lugar, la hidrólisis ácida obtuvo azúcares en el rango de 36.46 g a 40.21 g, con °Brix de 7.1 a 7.8 y densidades entre 1.027 y 1.031 g/mL. Finalmente, la hidrólisis básica presentó los resultados más bajos, con valores de 22.29 g hasta un máximo de 44.55 g, este último considerado un valor atípico debido al aumento puntual en °Brix (8.6) y densidad (1.036 g/mL) en una réplica específica.

Discusión

Los resultados evidencian que la hidrólisis enzimática fue la más efectiva en la liberación de azúcares fermentables a partir de la cáscara de plátano verde tipo Barraganete, lo que concuerda con estudios como el de Singh et al. (2014), quienes demostraron que el uso de enzimas específicas como amilasa y pectinasa mejora significativamente la liberación de azúcares desde matrices lignocelulósicas debido a la ruptura eficiente de polisacáridos complejos. Por otro

lado, la hidrólisis ácida mostró una eficiencia intermedia, lo cual coincide con lo reportado por Abdullah et al. (2015), donde se observará que la hidrólisis con ácido sulfurico al 2 % libera azúcares, pero su eficiencia depende de la concentración y el control del pH, ya que en exceso puede provocar la degradación de monosacáridos a compuestos inhibidores como furfural. Finalmente, la hidrólisis básica presentó los menores rendimientos, lo cual podría atribuirse a la liberación de compuestos fenólicos derivados de la fracción lignina, que interfieren en la eficiencia de liberación de azúcares fermentables. Este efecto ha sido ampliamente documentado, señalándose que dichos compuestos fenólicos actúan como inhibidores tanto de enzimas hidrolíticas como de microorganismos fermentadores, afectando procesos clave como la hidrólisis enzimática y la fermentación alcohólica (Jönsson et al., 2013; Klinke et al., 2004). Su toxicidad ha sido relacionada con su capacidad para alterar la permeabilidad y funcionalidad de las membranas celulares, inducir estrés oxidativo y precipitar proteínas enzimáticas, reduciendo así la eficiencia global del proceso de conversión.

En cuanto al contenido de etanol teórico máximo, se evidencia una correlación directa con la cantidad de azúcares fermentables disponibles. La hidrólisis enzimática, al generar las mayores concentraciones de azúcares, permitió proyectar un etanol teórico significativamente superior en comparación con los otros métodos. Esta tendencia reafirma la alta capacidad de las enzimas para romper las estructuras lignocelulósicas y liberar carbohidratos fermentables en mayor proporción, como también lo ha destacado (Oberoi, Vadlani, Saida, Bansal, & Hughes, 2011), al evaluar residuos agroindustriales. En contraste, la hidrólisis ácida se mantuvo en niveles moderados, limitada probablemente por la formación de subproductos secundarios durante el pretratamiento. Finalmente, la hidrólisis básica reflejó el menor potencial teórico, sugiriendo que bajo las condiciones empleadas no logró una degradación eficiente de la biomasa, tal como han señalado otros estudios enfocados en pretratamientos alcalinos de baja intensidad (Jebabli, Nsir, Taamalli, & Abu-Reidah, 2020).

Estas diferencias reafirman que la elección del método de hidrólisis es un factor determinante para maximizar la eficiencia global del proceso bioquímico. El análisis estadístico (ANOVA, $p < 0.0001$) y la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) confirmaron que la hidrólisis enzimática presentó diferencias significativas en sólidos solubles (10.70 °Brix) frente a la hidrólisis ácida (7.40 °Brix) y básica (6.00 °Brix), tal como se detalla en la Tabla 7. Esto valida que la hidrólisis enzimática no solo maximiza la liberación de azúcares, sino que también optimiza el rendimiento global del proceso bioquímico, cumpliendo con el objetivo central del estudio.

4.1.2. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para sólidos solubles obtenidos de los procesos de hidrólisis

Tabla 6.

Cuadro de Análisis de la Varianza (sólidos solubles)

Fuente	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	2	36.1533	18.0767	25.4061	0.0005
Error	6	4.2678	0.7113		
Total	8	40.4211			

Elaborado: Autora

Tabla 7.

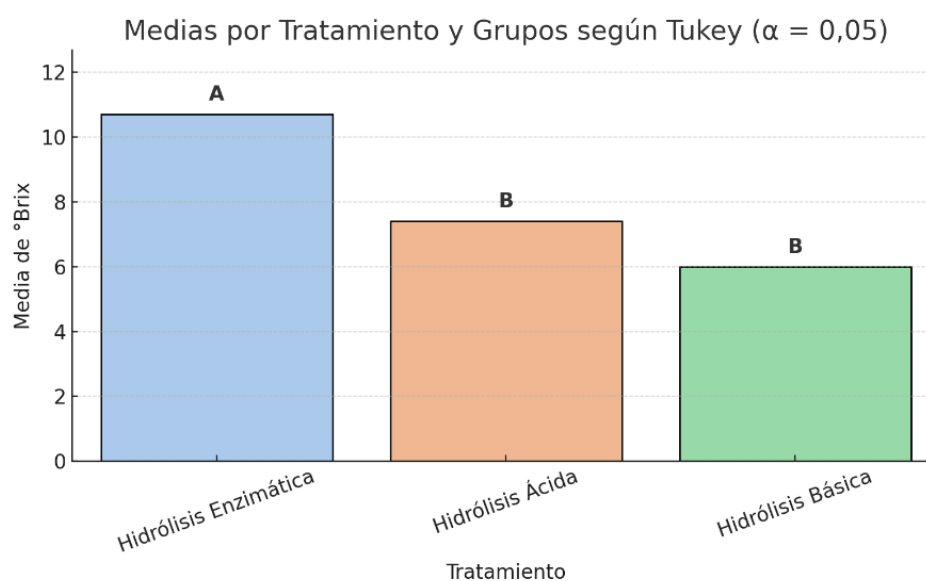
Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
Hidrólisis Enzimática	10.7	A
Hidrólisis Ácida	7.4	B
Hidrólisis Básica	6.0	B

Elaborado: Autora

Figura 4.

Medias por tratamiento



Elaborado: Autora

Tabla 8.*Comparaciones múltiples (Tukey HSD)*

Comparación	Diferencia	p-valor	Significancia
Hidrólisis Enzimática – Ácida	3.3	0.0323	*
Hidrólisis Enzimática – Básica	4.7	0.0016	*
Hidrólisis Ácida – Básica	1.4	0.3886	sd

Elaborado: Autora

Análisis

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado al contenido de sólidos solubles (°Brix) obtenidos tras los diferentes tratamientos de hidrólisis reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = 0.0076$), con un valor de $F = 10.80$ superior al valor crítico para $\alpha = 0.05$, lo que indica que al menos uno de los tratamientos tiene un efecto distinto sobre la liberación de azúcares fermentables.

La prueba de comparación de medias de Tukey HSD permitió agrupar los tratamientos en dos categorías estadísticas. El tratamiento de hidrólisis enzimática presentó una media significativamente superior (10.7 °Brix), siendo estadísticamente diferente a los tratamientos ácido (7.4 °Brix) y básico (6.0 °Brix), los cuales no difirieron significativamente entre sí ($p = 0.3886$). Las diferencias observadas reflejan una mayor eficiencia del tratamiento enzimático en la liberación de azúcares fermentables, lo cual se atribuye a la acción sinérgica de enzimas como amilasa y pectinasa, que rompen enlaces glucosídicos y pépticos de manera más específica y controlada que los agentes químicos.

Discusión

Los resultados obtenidos refuerzan la hipótesis de que el pretratamiento enzimático es significativamente más efectivo en la liberación de azúcares fermentables a partir de la cáscara de plátano verde tipo Barraganete. La media más alta de sólidos solubles obtenida con este tratamiento (10.7 °Brix) supera ampliamente las obtenidas con los tratamientos ácido y básico. Este hallazgo concuerda con lo reportado por Singh et al. (2014), quienes señalan que el uso combinado de enzimas específicas como la amilasa y la pectinasa mejora la eficiencia de hidrólisis en matrices lignocelulósicas, permitiendo una ruptura más dirigida de los polisacáridos.

Por otro lado, aunque la hidrólisis ácida logró valores intermedios (7.4 °Brix), su efectividad fue menor y no estadísticamente diferente del tratamiento básico. Esto se explica por la formación de productos de degradación como furfural y ácidos orgánicos bajo condiciones no óptimas de temperatura y pH, los cuales pueden limitar la eficiencia de liberación de azúcares (Abdullah et al., 2015). En el caso de la hidrólisis básica, se observó una mayor dispersión en los resultados y la media más baja de °Brix, lo que podría deberse a la solubilización parcial de lignina y la generación de compuestos fenólicos con efecto inhibitorio, tal como ha sido documentado por Klinke et al. (2004) y Jönsson et al. (2013).

4.1.3. Resultados estadísticos de los azúcares fermentables

Tabla 9.

ANOVA para Azúcares Fermentables (g)

Fuente	GL	SC	CM	F	Valor-p
Tratamiento	2	1260.0858	630.0429	7.9738	0.0172
Error	6	473.8850	78.9808	-	-
Total	8	1733.9708	-	-	-

Elaborado: Autora

Tabla 10.

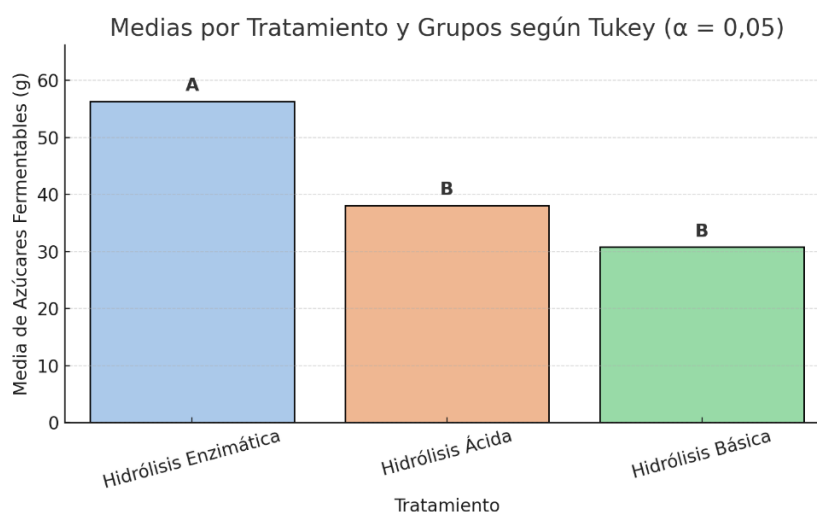
Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Tratamiento	Media	Grupo
Hidrólisis Enzimática	56.27	A
Hidrólisis Ácida	38.06	B
Hidrólisis Básica	30.75	B

Elaborado: Autora

Figura 5.

Medias por tratamiento



Elaborado: Autora

Análisis

El análisis estadístico evidencia diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.0172$), con un F de 7.97, confirmando que el tipo de pretratamiento influye de forma directa sobre la cantidad de azúcares fermentables liberados desde la cáscara del plátano tipo Barraganete. La hidrólisis enzimática generó la mayor cantidad de azúcares fermentables (56.27 g), siendo estadísticamente superior a los demás tratamientos. Los tratamientos ácido y básico no presentaron diferencias significativas entre sí, agrupándose en la misma categoría estadística (grupo B), con medias de 38.06 g y 30.75 g respectivamente.

Discusión

Los resultados obtenidos permiten confirmar que el pretratamiento enzimático fue el más eficiente en la liberación de azúcares fermentables, con diferencias significativas respecto a los métodos químico-ácido y básico. Esto coincide con lo reportado por Singh et al. (2014), quienes destacan que el uso combinado de enzimas como la amilasa y la pectinasa permite una degradación más efectiva de la matriz lignocelulósica, favoreciendo la ruptura de enlaces glucosídicos y pectínicos que impiden el acceso a los carbohidratos estructurales.

En contraste, la hidrólisis ácida, si bien mostró valores intermedios, no logró una conversión tan elevada, posiblemente por las limitaciones asociadas al uso de ácidos diluidos, como la generación de subproductos inhibitorios en condiciones de pH no controladas (Abdullah et al.,

2015). La hidrólisis básica, por su parte, presentó una mayor variabilidad en los datos, lo cual puede explicarse por la liberación de compuestos fenólicos y productos derivados de la lignina, que interfieren con la disponibilidad y cuantificación de azúcares (Klinke et al., 2004; Jönsson et al., 2013).

4.1.4. Resultados de los grados alcohólicos y etanol obtenido

Tabla 11.

Grados Alcohólicos y cantidad de etanol obtenidos

Método	Réplica	Levadura	°GL (Grados Alcohólicos)	Densidad (g/mL)	Etanol Obtenido (g)
Hidrólisis Ácida	1	<i>S. pastorianus</i>	26	0.9595	7.484
Hidrólisis Ácida	2	<i>S. pastorianus</i>	25	0.961	7.208
Hidrólisis Ácida	3	<i>S. pastorianus</i>	23	0.9645	6.655
Hidrólisis Ácida	1	<i>S. cerevisiae</i>	17	0.9735	4.965
Hidrólisis Ácida	2	<i>S. cerevisiae</i>	17	0.9735	4.965
Hidrólisis Ácida	3	<i>S. cerevisiae</i>	15	0.9765	4.394
Hidrólisis Básica	1	<i>S. pastorianus</i>	4	0.9936	1.192
Hidrólisis Básica	2	<i>S. pastorianus</i>	5	0.9914	1.487
Hidrólisis Básica	3	<i>S. pastorianus</i>	8	0.987	2.369
Hidrólisis Básica	1	<i>S. cerevisiae</i>	4	0.9936	1.192
Hidrólisis Básica	2	<i>S. cerevisiae</i>	4	0.9936	1.192
Hidrólisis Básica	3	<i>S. cerevisiae</i>	6	0.99	1.782
H. Enzimática	1	<i>S. pastorianus</i>	45	0.923	12.461
H. Enzimática	2	<i>S. pastorianus</i>	50	0.914	13.710
H. Enzimática	3	<i>S. pastorianus</i>	48	0.917	13.205
H. Enzimática	1	<i>S. cerevisiae</i>	36	0.94	10.152
H. Enzimática	2	<i>S. cerevisiae</i>	38	0.936	10.670
H. Enzimática	3	<i>S. cerevisiae</i>	34	0.9445	9.634

Elaborado: Autora

4.1.5. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para grados alcohólicos obtenidos

Tabla 12.

Cuadro de Análisis de la Varianza (grados alcohólicos)

Fuente	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	5	4930.8611	986.1722	297.9388	0.0000
Error	12	39.7389	3.3116		
Total	17	4970.6000			

Elaborado: Autora

Tabla 13.

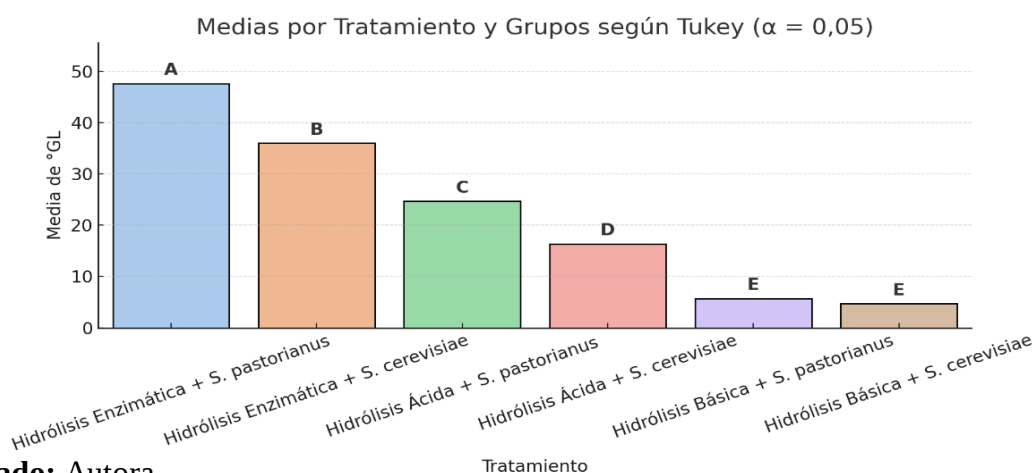
Prueba de Tukey para Comparación de Medias (grados alcohólicos)

Hidrólisis	Levadura	Media (°GL)	Grupo Tukey
Enzimática	<i>S. pastorianus</i>	47.67	A
Enzimática	<i>S. cerevisiae</i>	36.00	B
Ácida	<i>S. pastorianus</i>	24.67	C
Ácida	<i>S. cerevisiae</i>	16.33	D
Básica	<i>S. pastorianus</i>	5.67	E
Básica	<i>S. cerevisiae</i>	4.67	E

Elaborado: Autora

Figura 6.

Medias por tratamiento y grupos según Tukey ($\alpha = 0,05$)



Elaborado: Autora

Análisis

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los grados alcohólicos obtenidos después de la destilación evidenció diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($F = 297.94$; $p < 0.0001$). Esto indica que tanto el tipo de pretratamiento aplicado como la cepa de levadura utilizada influyeron de forma determinante sobre la cantidad de etanol producida.

El tratamiento más efectivo fue la combinación de hidrólisis enzimática con *Saccharomyces pastorianus*, con una media de 47.67 °GL, seguido por el mismo pretratamiento, pero con *S. cerevisiae*, que alcanzó 36.00 °GL. Estas dos combinaciones conformaron los grupos A y B según la prueba de Tukey HSD. Le siguieron los tratamientos ácidos: hidrólisis ácida + *S. pastorianus* (24.67 °GL) y hidrólisis ácida + *S. cerevisiae* (16.33 °GL), agrupados como C y D respectivamente. Finalmente, los valores más bajos se obtuvieron con los tratamientos básicos, con promedios de 5.67 °GL y 4.67 °GL, sin diferencias significativas entre ellos (grupo E).

Discusión

Los resultados muestran con claridad que la combinación del pretratamiento enzimático con la cepa *S. pastorianus* genera el mayor rendimiento alcohólico del estudio, superando en más de un 30 % a su contraparte con *S. cerevisiae*. Esto puede atribuirse a varias razones: por un lado, el pretratamiento enzimático ha demostrado ser más eficiente en la liberación de azúcares fermentables, como ya fue analizado previamente, y por otro lado, *S. pastorianus* posee una mayor tolerancia a concentraciones elevadas de etanol y a condiciones osmóticas exigentes, lo cual favorece su desempeño fermentativo en matrices con alta carga de azúcares (Singh et al., 2014).

En contraste, las combinaciones con hidrólisis ácida mostraron rendimientos intermedios. Aunque el ácido permite la liberación de azúcares en menor proporción, su efecto es altamente dependiente del control del pH y la concentración del reactivo, ya que en condiciones desfavorables puede provocar la formación de compuestos inhibitorios como furfural, que afectan negativamente la actividad de las levaduras como lo indica en su estudio Abdullah et al. (2015). Los tratamientos que emplearon hidrólisis básica resultaron ser los menos eficientes, con valores de etanol post-destilación considerablemente bajos.

Este resultado se encuentra en consonancia con lo reportado por Klinke et al. (2004) y Jönsson et al. (2013), quienes señalan que los tratamientos alcalinos tienden a liberar compuestos fenólicos de la lignina, los cuales actúan como potentes inhibidores del crecimiento microbiano

y de la actividad enzimática, afectando directamente la fermentación. Además, el hecho de que ambos tratamientos básicos hayan quedado en el mismo grupo estadístico (E) refuerza la hipótesis de que no sólo la cepa de levadura influye, sino que el tipo de pretratamiento limita de forma sustancial el potencial fermentativo del sistema. Así, la interacción entre tipo de hidrólisis y tipo de levadura resulta determinante para la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos.

4.1.6. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para la cantidad de etanol obtenido

Tabla 14.

Cuadro de análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	5	388.2766	77.6553	782.9633	<0.0001
Error	12	1.1906	0.0992		
Total	17	389.4672			

Elaborado: Autora

Tabla 15.

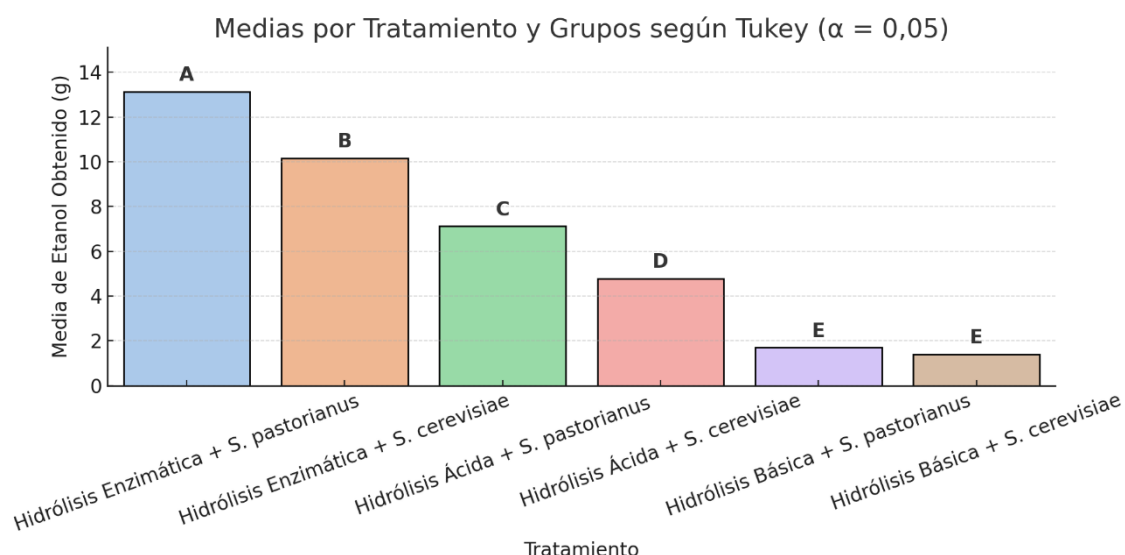
Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Hidrólisis	Levadura	Media (°GL)	Grupo Tukey
Enzimática	<i>S. pastorianus</i>	13.13	A
Enzimática	<i>S. cerevisiae</i>	10.15	B
Ácida	<i>S. pastorianus</i>	7.12	C
Ácida	<i>S. cerevisiae</i>	4.77	D
Básica	<i>S. pastorianus</i>	1.68	E
Básica	<i>S. cerevisiae</i>	1.39	E

Elaborado: Autora

Figura 7.

Medias por tratamientos



Elaborado: Autora

Análisis

El análisis de varianza aplicado a la cantidad de etanol recuperado después de la destilación mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos aplicados ($F = 782.96$; $p < 0.0001$). El valor de F tan elevado y el bajo error experimental reflejan una fuerte influencia de los factores combinados: tipo de hidrólisis y cepa de levadura.

La prueba de Tukey agrupó los tratamientos en cinco niveles estadísticamente diferentes. El tratamiento hidrólisis enzimática + *S. pastorianus* alcanzó la mayor producción de etanol, con una media de 13.13 g, y se ubicó en el grupo A. Le siguió la misma hidrólisis enzimática, pero con *S. cerevisiae*, con 10.15 g (grupo B). El tercer lugar correspondió a la combinación hidrólisis ácida + *S. pastorianus*, con 7.12 g de etanol destilado (grupo C), mientras que el tratamiento ácido con *S. cerevisiae* obtuvo una media más baja de 4.77 g (grupo D). Por último, ambos tratamientos con hidrólisis básica presentaron los resultados más bajos (1.68 g y 1.39 g), sin diferencia significativa entre ellos (grupo E).

Discusión

Los resultados confirman que la producción de etanol está fuertemente determinada por la interacción entre el tipo de pretratamiento aplicado y la levadura seleccionada para la fermentación. El hecho de que la combinación de hidrólisis enzimática con *S. pastorianus* haya

generado la mayor cantidad de etanol, tanto en grados alcohólicos como en gramos, refuerza el criterio de que este sistema es el más eficiente para la conversión de residuos lignocelulósicos en bioetanol. Este comportamiento puede explicarse por dos razones fundamentales: la elevada disponibilidad de azúcares fermentables liberados mediante la acción sinérgica de enzimas específicas como la amilasa y la pectinasa (Singh et al., 2014), y la alta tolerancia de *S. pastorianus* a condiciones osmóticas y etanólicas severas.

El rendimiento intermedio observado en los tratamientos con hidrólisis ácida se alinea con lo reportado por Abdullah et al. (2015), quienes advierten que este tipo de pretratamiento, aunque efectivo para liberar carbohidratos, conlleva el riesgo de generar compuestos como furfural y HMF si no se controlan adecuadamente el pH y la concentración del ácido. Estos compuestos actúan como inhibidores metabólicos que limitan la eficiencia fermentativa y la tolerancia de las levaduras.

En cuanto a los tratamientos con hidrólisis básica, los valores bajos de etanol obtenidos reflejan un efecto inhibitorio más marcado, probablemente asociado con la liberación de fenoles solubles y derivados de la lignina, los cuales interfieren en la actividad de las enzimas y en la viabilidad de las células fermentativas, como lo describen Klinke et al. (2004) y Jönsson et al. (2013). La poca diferencia entre los resultados obtenidos con ambas cepas en este tratamiento sugiere que el principal factor limitante no fue la levadura, sino la naturaleza química del medio generado tras la hidrólisis.

4.1.7. Resultados del análisis de la varianza y prueba de significación para la eficiencia del proceso de fermentación

Tabla 16.

Cuadro de análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	5	2706.4864	541.2973	712.5998	<0.0001
Error	12	9.1151	0.7596		
Total	17	2715.6015			

Elaborado: Autora

Tabla 17.

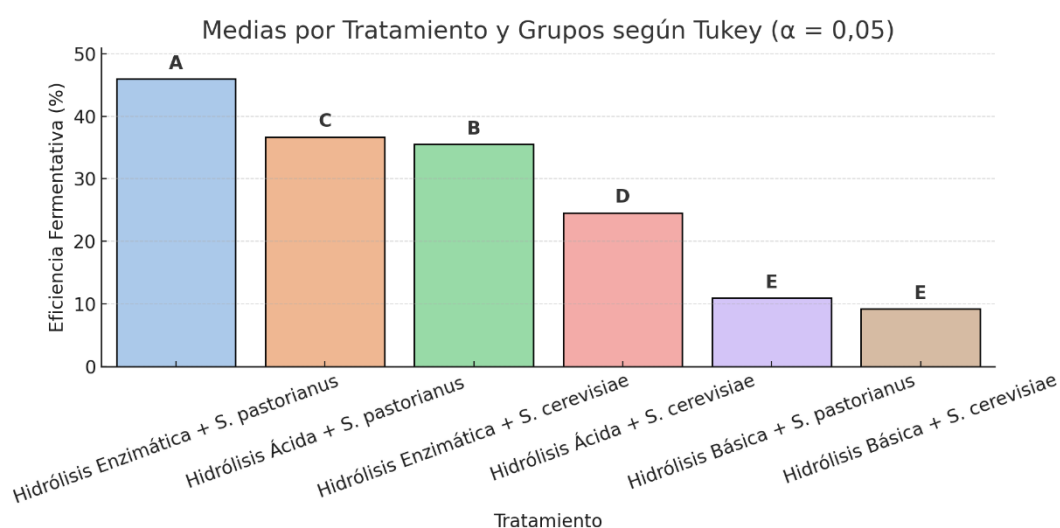
Medias por tratamiento y agrupación según Tukey ($\alpha = 0.05$)

Hidrólisis	Levadura	Media (°GL)	Grupo Tukey
Enzimática	<i>S. pastorianus</i>	45.97	A
Enzimática	<i>S. cerevisiae</i>	35.50	B
Ácida	<i>S. pastorianus</i>	36.67	C
Ácida	<i>S. cerevisiae</i>	24.57	D
Básica	<i>S. pastorianus</i>	10.90	E
Básica	<i>S. cerevisiae</i>	9.17	E

Elaborado: Autora

Figura 8.

Gráfico de Medias y Grupos de Tukey – Eficiencia Fermentativa (%)



Elaborado: Autora

Análisis

Los resultados del análisis de varianza muestran un efecto altamente significativo del tratamiento sobre la eficiencia fermentativa ($F = 712.60$; $p < 0.0001$). La prueba de Tukey identificó cinco grupos estadísticamente distintos, lo que indica que la eficiencia de conversión de azúcares a etanol depende no sólo del tipo de hidrólisis aplicada, sino también de la levadura empleada.

El tratamiento más eficiente fue hidrólisis enzimática con *S. pastorianus*, alcanzando una eficiencia promedio de 45.97 %, seguido por la misma hidrólisis pero con *S. cerevisiae* (35.50 %) y por hidrólisis ácida + *S. pastorianus* (36.67 %). Aunque las dos últimas se encuentran próximas en valor absoluto, estadísticamente se distinguen (grupos B y C). En los últimos lugares se ubicaron los tratamientos con hidrólisis básica, cuyas eficiencias fueron inferiores al 11 %.

Discusión

Los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema de producción que combina hidrólisis enzimática con *Saccharomyces pastorianus* no sólo es el que más etanol genera, sino también el que mejor convierte los azúcares disponibles en etanol, cumpliendo de manera contundente con el tercer objetivo planteado.

La eficiencia alcanzada por este tratamiento (casi 46 %) se justifica tanto por el tipo de pretratamiento como por la cepa seleccionada. Como ya fue demostrado por Singh et al. (2014), las enzimas específicas como la pectinasa y la amilasa logran romper eficientemente los polisacáridos presentes en matrices lignocelulósicas, facilitando su fermentación. Adicionalmente, *S. pastorianus* es reconocida por su elevada tolerancia al etanol y por mantener un metabolismo eficiente incluso en medios con elevada concentración de solutos.

Por otro lado, la eficiencia observada con *S. cerevisiae* fue menor, lo cual sugiere una menor capacidad de tolerancia a condiciones de estrés osmótico y alcohólico, especialmente en mostos de alta concentración. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado y coincide con las observaciones de Abdullah et al. (2015), quienes relacionan el rendimiento fermentativo con la resistencia fisiológica de la levadura.

En cuanto a la hidrólisis básica, los bajos valores de eficiencia se explican por la presencia de compuestos fenólicos y otros subproductos derivados de la lignina, que inhiben tanto la actividad enzimática como la viabilidad celular (Klinke et al., 2004; Jönsson et al., 2013). Esto evidencia que no solo importa la cantidad de azúcares disponibles, sino también la calidad del medio de fermentación, lo cual influye directamente en la eficiencia del proceso.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los resultados experimentales y el análisis estadístico confirmaron que la hidrólisis enzimática fue el pretratamiento más eficaz, alcanzando una media de 56.27 g de azúcares fermentables, estadísticamente superior (grupo A) a los métodos ácido y básico, según la prueba de Tukey ($p = 0.0172$). Este comportamiento está respaldado por la acción sinérgica de enzimas como la amilasa y la pectinasa, las cuales facilitan la degradación de polisacáridos complejos presentes en la matriz lignocelulósica del plátano verde tipo Barraganete, tal como lo han reportado Singh et al. (2014). La hidrólisis ácida mostró un rendimiento intermedio (38.06 g), mientras que la hidrólisis básica resultó la menos efectiva, posiblemente debido a la formación de compuestos fenólicos que interfieren con la liberación de azúcares (Klinke et al., 2004; Jönsson et al., 2013).
- La cepa *Saccharomyces pastorianus* demostró una mayor capacidad para la producción de bioetanol en comparación con *S. cerevisiae*, especialmente cuando se empleó junto al pretratamiento enzimático, alcanzando una producción promedio de 13.13 g de etanol frente a los 10.15 g obtenidos con *S. cerevisiae*. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas ($p < 0.0001$), como lo evidenció la prueba de Tukey, que ubicó ambos tratamientos en grupos distintos. Las combinaciones con hidrólisis ácida presentaron rendimientos intermedios, mientras que aquellas que utilizaron hidrólisis básica reflejaron los valores más bajos. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar una levadura robusta y adaptada al entorno fermentativo generado por el pretratamiento, considerando que subproductos derivados de la lignina pueden comprometer el rendimiento del proceso, especialmente en medios tratados con álcalis.
- Los datos muestran que la combinación de hidrólisis enzimática con *S. pastorianus* alcanzó la mayor eficiencia fermentativa, con un 45.97 %, ubicándose estadísticamente en el grupo A ($p < 0.0001$). Esto indica que no sólo produjo más etanol, sino que lo hizo con mayor aprovechamiento de los azúcares disponibles. Las demás combinaciones presentaron eficiencias decrecientes en el siguiente orden: *hidrólisis enzimática + S. cerevisiae* (35.50 %), *hidrólisis ácida + S. pastorianus* (36.67 %), *hidrólisis ácida + S. cerevisiae* (24.57 %), y por último las combinaciones con hidrólisis básica, con valores inferiores al 11 %, sin diferencias significativas entre sí. Estos resultados validan que la eficiencia fermentativa está determinada tanto por el tipo de hidrólisis como por la cepa fermentativa, y que un medio limpio, libre de

inhibidores y rico en azúcares fermentables, como el generado por la hidrólisis enzimática, resulta fundamental para optimizar el proceso de bioetanol.

5.2. Recomendaciones

- Implementar la hidrólisis enzimática como el pretratamiento estándar en procesos de conversión de residuos lignocelulósicos de musáceas, debido a su alta eficiencia en la liberación de azúcares fermentables. Se recomienda además optimizar la dosificación y actividad enzimática en función de la biomasa específica utilizada para maximizar el rendimiento.
- Adoptar *Saccharomyces pastorianus* como cepa preferente en sistemas de fermentación para residuos agroindustriales, especialmente en combinaciones con mostos enzimáticamente pretratados, ya que ha demostrado mayor tolerancia a concentraciones elevadas de etanol y un mejor aprovechamiento de los azúcares disponibles.
- Monitorear y controlar rigurosamente parámetros críticos como pH, temperatura y tiempo de fermentación, ya que estos factores influyen directamente en la eficiencia de conversión y en la estabilidad del proceso biotecnológico. Se sugiere establecer protocolos estandarizados para procesos a escala piloto o industrial

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, A., Sathivelu, T., Ravichandran, S., Rajandrin, K., Roshd, M., & Yusoff, Z. (2015). *Identification best type of banana peel (glucose contain) to produce bioethanol for the development of biofuel (E85)*. Shah Alam, Malaysia: Innovation & Commercialization of Medical Electronic Technology Conference (ICMET).
- Aburto, J., Martínez, T., & Murrieta, F. (2008). Evaluación técnico-económica de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23-30. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48223104>
- Akhtar, N., Gupta, K., Goyal, D., & Goyal, A. (2015). Recent Advances in Pretreatment Technologies for Efficient Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, 489–511. doi:<https://doi.org/10.1002/ep>.
- Albarracín, K., Jaramillo, L., & Albuja, M. (2015). Obtención de bioetanol anhidro a partir de paja (Stipa ichu). *Revista Politécnica*, 36(2), 109.
- Arce, C. (2024). *Meta-análisis del impacto de la temperatura y del pH en la eficacia de la fermentación durante el proceso de hidrólisis enzimática para producir bioetanol a partir de sorgo*. Universidad Privada del Norte.
- Arellano, W. (2021). *Obtención de bioetanol a partir de los residuos sólidos orgánicos del mercado de abasto de la municipalidad distrital de huacho*. Huacho, Perú: Universidad Nacional José Faustino Sánchez .
- Badaraco, R., & Veintimilla, G. (2019). *Cinética de sacarificación y fermentación para producción de bioetanol a partir de cáscara de banano maduro mediante pretratamiento de secado*. Machala, Ecuador: UTMACH.
- Bailey, J., & Ollis, D. (1986). *Biochemical Engineering Fundamentals (2nd ed.)*. McGraw-Hill.
- Bardales, C., Cabos, J., León, C., & Jara, E. (2020). Enriquecimiento proteico de los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales de la Región La Libertad con la asociación mixta de *Trichoderma reesei*, *Chaetomium cellulolyticum* y *Candida utilis* para alimentación animal. *Arnaldoa*, 1007-1016.

- Beltràn, R. (2012). *Rendimientos de bioetanol en fermentaciones realizadas con mostos de alta concentracion de solido*. Córdoba, Argentina: Grupo de Investigación en Simulación para Ingeniería Química -GISIQ.
- Boada, L., Sánchez, J., & Wen, Y. (2018). ndagación exploratoria in vitro de la capacidad degradadora de la cepa comercial *Pleurotus ostreatus* sobre dos concentraciones de petróleo crudo. *NOVA*, 31-35.
- Cabrera, S., Gómez, A., Martínez, A., & Quintero, R. (2000). *Biocombustibles a partir de recursos lignocelulósicos: estudio del caso, bagazo de caña en México*. Nuevo México: Centro de Investigación en Biotecnología UAEM, Instituto Mexicano del Petróleo, Instituto de Biotecnología- -UNAM.
- Chávez, C. (2021). Potencialidad de Biocombustibles a partir de Residuos Orgánicos. *Revista Scientific*, 40/57.
- Conde, C., Jiménez, A., & Halwagi, M. (2011). Comparison of Pretreatment Methods for Bioethanol Production from Lignocellulosic Materials. *Process Saf. Environ. Prot*, 189–202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.08.004>
- Coronel, J., & Cuéllar, M. (2015). *Elaboración de etanol industrial a partir de cáscara de banana (Musa paradisiaca)*. Carabobo, Venezuela: Revista Científica, Universidad de Carabobo.
- Dunn, B., & Sherlock, G. (2008). Reconstrucción de los orígenes del genoma y evolución de la levadura lager híbrida *Saccharomyces pastorianus*. *Genome Reseach*, 1610-1623.
- Elbehri, A., Calberto, C., Staver, A., Hospido, L., Roibas, D., Skully, P., Arguello. (2015). *Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Ennouri, H., Miladi, B., Díaz, S., Solera, R., & Hamdi, M. (2016). Efecto del tratamiento térmico previo sobre la producción de biogás y el equilibrio de las comunidades microbianas durante la digestión anaeróbica de lodos activados de residuos urbanos e industriales. *Biorour. Tecnol.* 214 , 184-191.
- García, J., Machimura, T., Matsui, T., & Miyauchi, T. (2014). Estimating the potential and planning of bioethanol production from agro-residues based on a model-predicted NPP

- under climate change in Ecuador. *Journal of Agricultural Meteorology*, 70(4), 171-185.
doi:<https://doi.org/10.2480/agrmet.D-13-00027>
- Gibert, O., Dufour, D., Giraldo, A., Sánchez, T., Reynes, M., Pain, J.-P., Díaz, A. (2010). Differentiation between cooking bananas and dessert bananas. 1. Morphological and compositional characterization of cultivated Colombian Musaceae (*Musa* sp.) in relation to consumer preferences. *J Agric Food Chem*, 25;58(16).
- Gómez, C., Cos Blanco, A., & Iglesias, C. (2002). Fibra y nutrición enteral. *Nutrición Hospitalaria*, 17(2):30-40.
- Gracia, X. L. (2021). La Generación Distribuida y las Fuentes Renovables de energía en el Ecuador. *Dominio De Las Ciencias*, 7(3), 884–895.
doi:<https://doi.org/10.23857/dc.v7i3.1973>
- Guaraca, N. (2023). *Extracción de azúcares fermentables a partir del nopal (opuntia ficus) de la estación experimental tunshi-riobamba mediante hidrólisis ácida como fuente de obtención de bioetanol*. Macas, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Guerrero, A., & Muñoz, E. (2018). Life cycle assessment of second- generation ethanol derived from banana agricultural waste: Environmental impacts and energy balance. *Journal of Cleaner Production*, 710-717. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.298>
- Hernández, C. (2017). *Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de fruta*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Hernández, C. d. (2016). Fabricando bioetanol. *Comercialización de Tecnología, Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento, Benemérita*, 10/24.
- Infinitia Industrial Consulting . (2022). *Biotecnología en la industria alimentaria*. España: Innovacion y tecnología. Obtenido de Biotecnología en la industria alimentaria.
- INIAP. (2021). *Banano, plátano y otras musáceas*. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Jara, E., Leiva, F., Martin, E., Medina, K., Bardales, C., & León, C. (2022). Los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales de La Libertad y la producción de biomasa de *Candida utilis* var. Major. *Arnaldoa*, 163-176.

- Jebabli, H., Nsir, H., Taamalli, A., & Abu-Reidah, I. (2020). Industrial-Scale Study of the Chemical Composition of Olive Oil Process-Derived Matrices. *Compuestos Fenólicos: Extracción, Optimización, Identificación y Aplicaciones en la Industria Alimentaria*, 701.
- Jönsson, L., Alriksson, B., & Nilvebrant, N. (2013). Bioconversión de lignocelulosa: inhibidores y desintoxicación. *Biotecnología para Biocombustibles*, 6 (1), 16. doi:<https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-16>
- Klinke, H., Thomsen, A., & Ahring, B. (2004). Inhibición de levaduras y bacterias productoras de etanol por productos de degradación generados durante el pretratamiento de biomasa. *Microbiología Aplicada y Biotecnología*, 66 (1), 10–26. doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-004-1642-2>
- Llangari, A. (2018). *Comparación del rendimiento y calidad de bioetanol obtenido a partir de la biomasa lignocelulosa de los pseudotallos de banano*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana .
- Llenque, L., Díaz, A., Torres, L., & Segura, R. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales. *Revista de Investigación Científica REBIOL*, 21-29.
- Macias, A., Pérez, J., & Torres, J. (2022). Pasado, presente y perspectiva del Bioetanol en Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 38 - 51. doi:<https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol15iss40.2022pp38-51p>
- Melo-Sabogal, D., Torres, J., Serna, J., & Torres, L. (2018). Aprovechamiento de Pulpa y Cáscara de Plátano (*Musa paradisiaca* Spp) para la Obtención de Maltodextrina. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, Volume 13, 76-85(10).
- Monsalve, J., Medina, V., & Ruiz, Á. (2006). *Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y almidón de yuca*. Cali, Colombia : Universidad de Colombia.
- Montero de la Cruz, S. (2017). *Análisis de Ciclo de Vida de la Producción de Biocombustibles líquidos (BUTANOL) a partir de Subproductos Lignocelulósicos (Pulpa de Remolacha)*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid .
- NTE INEN 340. (2016). *Bebidas alcohólicas. Determinación del contenido de alcohol etílico*. Quito, Ecuador: Norma Técnica Ecuatoriana. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/383434649/nte-inen-340-2>

- NTE INEN1529-10. (2013). *Control microbilógico de los alimentos. Mohos y levaduras viables. Recuento en placa por siembra en profundidad*. Quito, Ecuador: Norma técnica Ecuatoriana.
- Oberoï, H., Vadlani, P., Saida, L., Bansal, S., & Hughes, J. (2011). Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. *Waste Management*, 1576-1584.
- Offeau, A., Barrell, B., & Bussey, H. (1996). La vida con 6000 genes. *Science*, 563–547.
- Olumba, C. (2014). Productivity of Improved Plantain Technologies in Anambra State, Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*, 2196-2204.
- Ostos, O., Rosas, S., & González, J. (2019). Aplicaciones biotecnológicas de los microorganismos. *Nova*, 129-163.
- Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* y sus aplicaciones industriales. *AIMS Microbiology*, 1–31.
- Prado, E., & Cervantes, A. (2017). Factores que afectan al cultivo de caña de azúcar para producción de bioetanol en Ecuador. *European Scientific Journal*, 13(24), 58-65.
- Rabi, B., Kumar, S., & Krushna, P. (2022). Bioconversion of Lignocellulosic Biomass into Bioethanol: A Sustainable Approach. *Research Journal of Biotechnology*, 147 - 230.
- Ramos, A., Carrillo, D., Cedeño, R., & Ramos, J. (2023). Panorama Energético de los Biocombustibles en el Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 10254-10275. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7729
- Rojas, A., Rodríguez, S., & Montoya, J. (2019). Evaluación de Alternativas de Aprovechamiento Energético y Bioactivo de la Cáscara de Plátano. *Información tecnológica*, 11-24.
- Segura, A., Manriquez, A., Santos, D., Ambriz, E., Casas, P., & Muñoz, A. (2020). Obtención de bioetanol a partir de residuos de cáscara de piña (ananas comosus). *Jóvenes en la ciencia*, 1–8.
- Shuler, M., & Kargi, F. (2017). *Bioprocess Engineering: Basic Concepts (3rd ed.)*. Prentice Hall.

- Sigüencia, J., Delgado, J., Posso, F., & Sánchez, J. (2020). Estimación del potencial de producción de bioetanol a partir de los residuos de la corteza del cacao en Ecuador. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3).
doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1429
- Sindhu, R., Binod, P., & Pandey, A. (2015). Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass – An Overview. *Bioresour. Technol*, 76–82.
- Singh, A., Rath, S., Kumar, Y., Masih, H., Peter, J., Benjamin, J., Singh, P. (2014). Bio-Ethanol production from banana peel by simultaneous saccharification and fermentation process using cocultures *Aspergillus niger* and *Saccharomyces cerevisiae*. . *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(5), 84-96.
- Solarte, J., Romero, J., Martínez, J., Ruiz, E., Castro, E., & Cardona, C. (2019). Acid pretreatment of lignocellulosic biomass for energy vectors production: A review focused on operational conditions and techno-economic assessment for bioethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 587-601.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.024>
- Song, Y., Wi, S., Kim, H., & Bae, H. (2016). Cellulosic Bioethanol Production from Jerusalem Artichoke (*Helianthus Tuberosus* L.) Using Hydrogen Peroxide-Acetic Acid (HPAC) Pretreatment. *Bioresour. Technol*, 30–36.
- Sosa, D. (2006). *Introducción, expansión y consolidación de la agroindustria azucarera en México*. México: Universidad Veracruzana.
- Stanbury, P., Whitaker, A., & Hall, S. (2017). *Principles of Fermentation Technology* (3rd ed. Butterworth-Heinemann.
- Tewari, H., Marwaha, S., & Rupal, K. (1986). Ethanol from banana peels. *Agricultural Wastes*, 16(2), 135-146.
- Zamora, T., Prado, A., Capataz, J., & Barrera, B. (2014). Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales. *Educación química*, 122-127.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1.

Recepción y preparación



Figura 9. *Materia prima (Cáscara de plátano barraganete)*



Figura 10. *Troceado y pelado de la cáscara*

Anexo 2.

Deshidratación y molienda



Figura 11. *Cáscara deshidratada y pesada*



Figura 12. *Molienda de cáscaras deshidratada*

Anexo 3.

Preparación de la muestra



Figura 13. Toma de la muestra para el análisis



Figura 14. Preparación de soluciones

Anexo 4.

Inicio de la hidrólisis



Figura 15. Autoclavado de muestras (hidrólisis)

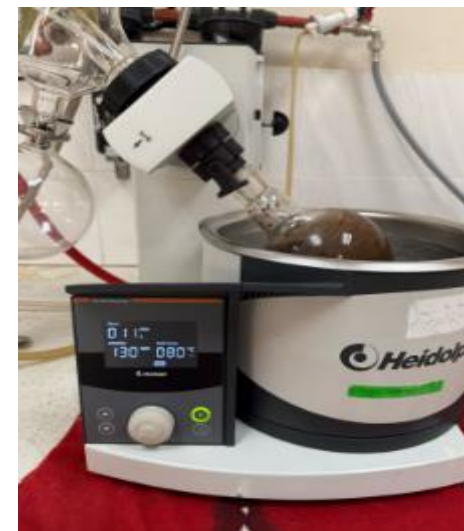


Figura 16. Homogeneización de hidrólisis enzimática

Anexo 5.

Determinación de pH



Figura 17. *Perdición de pH*



Figura 18. *Medición de pH*

Anexo 6. Centrifugación



Figura 19. *Centrífuga de muestras*



Figura 20. *Muestra centrifugada*

Anexo 7. Mediciones correspondientes



Figura 21. *Medición de brix*



Figura 22. *Medición de grados alcohólicos*

Anexo 8. Fermentación



Figura 23. *Fermentación de muestras*



Figura 24. *Muestras fermentando en incubadora a 30° C*

Anexo 9. Destilación



Figura 25. Preparación para el proceso de destilación



Figura 26. Proceso de destilación fraccionada