

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOTECNOLOGÍA



Efecto de la relación: mosto/agua y la relación de reflujo en la concentración de bioetanol obtenido a partir de pulpa de plátano de seda (*Musa paradisiaca*) empleando *Saccharomyces cerevisiae*.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE LICENCIADO EN BIOTECNOLOGÍA

AUTORES:

Bach. Abanto Velásquez, Lennin David

Bach. Mendoza Ramos, Smit

ASESOR:

M.Sc. Blgo. Mclgo. Villanueva Carlos, José Manuel

ORCID: 0000-0002-5056-0001

NUEVO CHIMBOTE – PERU

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOTECNOLOGÍA



Efecto de la relación: mosto/agua y la relación de reflujo en la concentración de bioetanol obtenido a partir de pulpa de plátano de seda (*Musa paradisiaca*) empleando *Saccharomyces cerevisiae*.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE LICENCIADO EN BIOTECNOLOGÍA

Revisado y aprobado por el asesor

M.Sc. Blgo. Mclgo. Villanueva Carlos, José Manuel

DNI:06451148

ORCID: 0000-0002-5056-0001

ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOTECNOLOGÍA



Revisado y Aprobado Por El Jurado Evaluador:

Dr. Castro Alvarado Ángel
DNI:06451148

ORCID: 0000-0002-5984-0587

PRESIDENTE

Mag. Diestra Balta, Jesús

DNI:70553964

ORCID: 0000-0003-2462-2229

SECRETARIO

M.Sc. Villanueva Carlos, José

DNI:32733772

ORCID: 0000-0002-5056-0001

INTEGRANTE

ACTA DE CALIFICACIÓN DE LA SUTENTACIÓN DE LA TESIS

En el Distrito de Nuevo Chimbote, en la Universidad Nacional de Santa, en el Laboratorio de Investigación en Biotecnología de la Facultad de Ciencias de la UNS siendo las 16:00 horas del día 12 de marzo del 2024, dando cumplimiento a la Resolución N° 542-2023-UNs-CFC, se reunió el Jurado Evaluador presidido por el Dr. Ángel Pablo Castro Alvarado, teniendo como miembros a Ms. Jesús Grabiél Diestra Balta (secretario), y Ms. José Villanueva Carlos (integrante), para la sustentación de tesis a fin de optar el título de **LICENCIADO EN BIOTECNOLOGIA**, realizado por el, (la), (los) tesista (as) Lennin David Abanto Velásquez y Smith Mendoza Ramos, quien (es) sustentó (aron) la tesis intitulada: **"Efecto de la relación mosto: agua y la relación de reflujos en la concentración de bioetanol obtenido a partir de pulpa de plátano de seda, Musa paradisiaca"**.

Terminada la sustentación, el (la), (los) tesista (as)s respondió (ieron) a las preguntas formuladas por los miembros del jurado.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como **BUENO** asignándole un calificativo de **17** puntos, según artículo 40° del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, vigente (Res.471-2002-CU-R-UNS)

Siendo las 17:00 horas del mismo día se dio por terminado el acto de sustentación firmando los miembros del Jurado en señal de conformidad



Dr. Angel Pablo Castro Alvarado
Presidente



Ms. Jesús Grabiél Diestra Balta
Secretario



Ms. José Manuel Villanueva Carlos
Integrante

EFFECTO DE LA RELACIÓN: MOSTO/AGUA Y LA RELACIÓN DE REFLUJO EN LA CONCENTRACIÓN DE BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE PULPA DE PLÁTANO DE SEDA (MUSA PARADISIACA) EMPLEANDO SACCHAROMYCES CEREVISIAE"

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	20%	2%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	es.slideshare.net Fuente de Internet	1%
3	recursosbiblio.url.edu.gt Fuente de Internet	1%
4	core.ac.uk Fuente de Internet	1%
5	www.unistmo.edu.mx Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Francisco de Vitoria Trabajo del estudiante	<1%
7	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
8	es.wikipedia.org Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de mi vida.

A mi bella esposa Kaithmarley por ser el apoyo y estímulo necesario que me brinda día con día para alcanzar mis metas profesionales y darme un hijo maravilloso “Felipe”.

A mis padres, Cesar y Anita, por darme la vida, por darme el amor incondicional, creer en mí y porque siempre me apoyaron. Todo esto se lo debo a ustedes.

A mis tíos Rocky y Gloria que me enseñaron el deseo de superación y el anhelo de triunfo de la vida.

A mis hermanos Elton y Wendy por brindarme su amor y estar conmigo siempre.

Con mucho cariño dedico estas páginas a todos quienes me apoyaron constantemente con palabras de aliento para seguir y poder culminar una meta más en mi vida.

A mis padres que depositaron su confianza en mí, quienes día a día me brindan su fe, amor y perseverancia, para ser en un futuro alguien mejor, que con sus bendiciones siempre me dan seguridad, que, sin el apoyo de ellos, quizás no hubiese podido escribir esta dedicatoria.

Esto es posible gracias a todos ustedes.

Smit

AGRADECIMIENTO

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA por darnos la oportunidad de estudiar y ser profesionales.

A nuestro asesor, MSc. Blgo. Mclgo. Villanueva Carlos José Manuel, por compartir su enorme experiencia con sus comentarios y consejos hacia el trabajo.

A nuestros profesores de la carrera profesional por su aporte a nuestra formación, por consejos, enseñanzas, apoyo incondicional y por su amistad.

A Oscar Chauca Quintana por su asistencia técnica, sugerencias y apoyo en la ejecución de esta investigación.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Descripción y formulación del problema	15
1.2 Objetivos de la investigación.....	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Formulación de hipótesis.....	17
1.4 Justificación e importancia	17
II. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Antecedentes	19
2.2 Marco conceptual	24
2.2.1 Glucolisis.....	24
2.2.2 Fermentación	26
2.2.3 Fermentación del etanol.....	26
2.2.4 Destilación.....	27
2.2.5 Ratio de reflujo	29
2.2.6 Biocombustibles	29
2.2.7 Bioetanol	31
III. MATERIALES Y METODOS	32
3.1 Análisis Físico-químico de la pulpa de plátano de seda (Musa paradisiaca).....	32
3.2 Generación de unidades experimentales.....	32
3.3 Determinación de las condiciones Óptimas de Fermentación.	33
3.4 Fermentación del mosto.....	34
3.5 Destilación del mosto	37
3.6 Diseño estadístico.....	39
IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN	42
4.1 Característica Físicoquímica de la Residuos Fermentables de plátano:.....	42
4.2 Condiciones Óptimas para la Fermentación del Mosto.....	43
4.2.1 Fermentación Alcohólica del Mosto de pulpa de plátano.....	43
4.2.1.1 Cinética microbiana del proceso fermentativo	43
4.2.1.2 Comportamiento del pH durante el proceso de Fermentación.....	50

4.2.1.3	Comportamiento de los °Brix durante el proceso de Fermentación..	53
4.2.1.4	Análisis del Efecto del pH durante el proceso de Fermentación de la pulpa de plátano.	54
4.2.1.5	Análisis del Efecto de la Relación Mosto: Agua en el °Bx durante el proceso de Fermentación de la pulpa de plátano.	56
4.2.1.6	Determinación de rendimiento de los Mostos: R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30) posterior a 6 días de fermentación.....	57
4.3	Determinación de las Condiciones Óptimas de Destilación del Fermentado de pulpa de plátano.....	59
V.	CONCLUSIONES	64
VI.	RECOMENDACIONES	66
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
VIII.	ANEXOS	72
	Anexo 1. Proceso de elaboración de mosto de pulpa de plátano.....	72
	Anexo 2. Proceso de destilación de mosto fermentado de pulpa de plátano.....	76
	Anexo 3. Parámetros de destilación de mostos	79
	Anexo 4. Datos experimentales de la fermentación Mosto: Agua 20:50 (R1).....	82
	Anexo 5. Datos experimentales de la fermentación Mosto: Agua 30:40 (R2).....	83
	Anexo 6. Datos experimentales de la fermentación Mosto: Agua 40:30 (R3).....	84
	Anexo 7. Datos experimentales de la fermentación Control.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Generaciones de biocombustibles.	31
Tabla 2.	Relación P-A (mosto: agua).....	33
Tabla 3.	Diseño DCA.....	40
Tabla 4.	Caracterización fisicoquímica de la pulpa de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)..	42
Tabla 5.	Parámetros fermentativos de la relación Mosto: Agua 20:50 (R1).....	44
Tabla 6.	Parámetros cinéticos de relación Mosto: Agua 20:50 (R1).....	45
Tabla 7.	Parámetros fermentativos de la relación Mosto: Agua 30:40 (R2).....	46
Tabla 8.	Parámetros cinéticos de relación Mosto: Agua 30:40 (R2).....	47
Tabla 9.	Parámetros fermentativos de la relación Mosto: Agua 40:30 (R3).....	48
Tabla 10.	Parámetros cinéticos de relación Mosto:Agua 40:30 (R3).	49
Tabla 11.	Cuadro comparativo de rendimientos de los tratamientos realizados.....	49
Tabla 12.	Parámetros fermentativos de Mosto: Agua 20:50 (R1), Mosto-Agua 30:40 (R2) y Mosto: Agua 40: 30 (R3)	50
Tabla 13.	Concentración de Levadura y Relación Mosto: Agua de trabajo.	50
Tabla 14.	Comportamiento del pH durante el proceso de fermentación.	51
Tabla 15.	Comportamiento de °Bx durante el proceso de Fermentación.....	53
Tabla 16.	ANOVA para pH por Dilución.....	54
Tabla 17.	Pruebas de Múltiple Rangos.....	55
Tabla 18.	ANOVA para °Bx por Dilución	56
Tabla 19.	Pruebas de Múltiple Rangos.....	56
Tabla 20.	Rendimiento de Bioetanol a partir de pulpa de plátano.	57
Tabla 21.	Resultados del proceso de destilación Mosto: Agua 20:50 (R1).	60
Tabla 22.	Resultados del proceso de destilación Mosto:Agua 30:40 (R2).	60
Tabla 23.	Resultados del proceso de destilación Mosto:Agua 40:30 (R3).	61
Tabla 24.	Controles de proceso de destilación sin el uso de reflujo.	61
Tabla 25.	Datos de réplicas de biomasa Tratamiento Mosto: Agua 20:50 (R1)	82
Tabla 26.	Datos de réplicas de azúcares Tratamiento Mosto: Agua 20:50 (R1).....	82
Tabla 27.	Datos de réplicas de bioetanol Tratamiento Mosto: Agua 20:50 (R1).....	82
Tabla 28.	Datos de réplicas de biomasa Tratamiento Mosto:Agua 30:40 (R2)	83
Tabla 29.	Datos de réplicas de azúcares Tratamiento Mosto:Agua 30:40 (R2).....	83
Tabla 30.	Datos de réplicas de bioetanol Tratamiento Mosto:Agua 30:40 (R2).....	83
Tabla 31.	Datos de réplicas de biomasa Tratamiento Mosto:Agua 40:30 (R3)	84
Tabla 32.	Datos de réplicas de azúcares Tratamiento Mosto:Agua 40:30 (R3).....	84
Tabla 33.	Datos de réplicas de bioetanol Tratamiento Mosto:Agua 40:30 (R3).....	84
Tabla 34.	Datos de réplicas de biomasa Tratamiento control.....	85
Tabla 35.	Datos de réplicas de azúcares Tratamiento control	85
Tabla 36.	Datos de bioetanol réplicas N° 1, 2 y 3 del tratamiento control.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Representación gráfica del ciclo de Krebs.	25
Figura 2.	Ruta metabólica de la fermentación alcohólica	27
Figura 3.	Esquema de un destilador de columna de laboratorio	29
Figura 4.	Diagrama de procesos de obtención de bioetanol.	41
Figura 5.	Cinética microbiana de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> de (R1).	43
Figura 6.	Determinación de velocidad específica de crecimiento de (R1).	44
Figura 7.	Cinética microbiana de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> de (R2).	45
Figura 8.	Determinación de velocidad específica de crecimiento de (R2).	46
Figura 9.	Cinética microbiana de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> de (R3).	47
Figura 10.	Determinación de velocidad específica de crecimiento de (R3).	48
Figura 11.	Comportamiento de pH durante la Fermentación.....	51
Figura 12.	Comportamiento de °Bx durante la Fermentación	54
Figura 13.	Rendimiento de Bioetanol a partir de la pulpa de plátano	57
Figura 14.	Volumen de destilado y grados Alcohólicos obtenidos.....	59
Figura 15.	Construcción de los biodigestores	72
Figura 16.	Pelado de plátano	72
Figura 17.	Pesado del plátano	73
Figura 18.	Triturado de plátano.....	73
Figura 19.	Bidones con sus respectivas muestras	74
Figura 20.	Medición de pH y Grados Brix	74
Figura 21.	Centrifugación de muestras.....	75
Figura 22.	Frascos vacíos empleados para la medición de muestra de destilado	76
Figura 23.	Destilado en el laboratorio de operaciones unitarias de agroindustria	76
Figura 24.	Panel de control del equipo de destilación, equipo destilador continuo ...	77
Figura 25.	Etanol obtenido, equipo destilador continuo	77
Figura 26.	Instrumentos para la medición	78
Figura 27.	Resultado final de la destilación.	78

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la relación de agua: mosto y la relación de reflujo en la concentración de bioetanol obtenido a partir de pulpa de plátano de seda (*Musa paradisiaca*). La fermentación de la pulpa de plátano (mosto), se realizó en bidones de plástico de 20 litros con un volumen de trabajo de 7 litros. En estos biorreactores se evaluaron las ratios experimentales de 20:50; 30:40 y 40:30 %v/v de mosto: agua a una temperatura de 29°C. Durante el proceso de fermentación se realizaron muestreos periódicos para determinar biomasa, pH, °Bx, densidad y grados alcohólicos del mosto. El mosto fermentado obtenido fue centrifugado y destilado. En el proceso de destilación se evaluó los ratios experimentales de razón de reflujo de 1seg/1seg; 1seg/2seg; y 1seg/3seg.

El estudio de caracterización fisicoquímica de la pulpa de plátano, dio como resultados valores de 12°Brix, Humedad =79%, pH = 4.50 y Densidad (kg/cm³) = 1.02, Índice de Acidez = 0.5 %. Utilizando el diseño experimental planteado se evidenció la obtención de etanol por medio de la fermentación alcohólica de la pulpa de plátano usando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en un periodo de 07 días. Los resultados de los parámetros fermentativos obtenidos en este trabajo evidencian que a la concentración de levadura de 1g/L y una Relación mosto: agua de 20:50 generan el mayor volumen de fermentado de 3.2L de bioetanol. Los parámetros para la obtención de Bioetanol mediante destilación rectificadora evidenciaron que utilizando un ratio de 3L/h de flujo y 0.3 de reflujo de destilado (1 segundo cerrado / 1 segundo abierto) se obtuvo 350 ± 0.5 mL de destilado con un grado alcohólico de 22 ± 1°G.L. Paralelamente, utilizando un reflujo de 1 segundo cerrado / 3 segundo abierto se genera un mayor volumen de destilado se obtuvo (450 ± 0.4 mL) con un mayor contenido de alcohol de 35 ± 0.4°GL. Los análisis estadísticos evidencian la existencia de diferencias significativas entre Relaciones de mosto: agua evaluadas, así como una alta diferencia significativa entre los reflujos evaluados en destilación viéndose esta en los volúmenes finales de destilación (350 ± 0.5, 420 ± 0.2 y 450 ± 0.4 mL) y en los grados alcohólicos (22 ± 1, 30 ± 0.5 y 35 ± 0.4 °GL).

Palabras clave: Bioetanol, *Musa paradisiaca*, destilación, Relación Mosto: Agua, reflujo de destilado

ABSTRACT

The objective of this research work was to evaluate the effect of the water: wort ratio and the reflux ratio on the concentration of bioethanol obtained from silk plantain pulp (*Musa paradisiaca*). The fermentation of the plantain pulp (wort) was carried out in 20-liter plastic drums with a working volume of 7 liters. In these bioreactors, the experimental ratios of 20:50; 30:40 and 40:30 %v/v wort: water were evaluated at a temperature of 29°C. During the fermentation process, periodic sampling was carried out to determine biomass, pH, °Bx, density and alcohol content of the wort. The fermented wort obtained was centrifuged and distilled. In the distillation process, the experimental reflux ratio ratios of 1sec/1sec; 1sec/2sec; and 1sec/3sec were evaluated.

The physicochemical characterization study of the plantain pulp yielded values of 12°Brix, Humidity = 79%, pH = 4.50 and Density (kg/cm³) = 1.02, Acidity Index = 0.5 %. Using the experimental design, it was demonstrated that ethanol was obtained through the alcoholic fermentation of plantain pulp using *Saccharomyces cerevisiae* yeast in a period of 7 days. The results of the fermentation parameters obtained in this work show that a yeast concentration of 1 g/L and a wort: water ratio of 20:50 generate the highest fermentation volume of 3.2 L of bioethanol. The parameters for obtaining bioethanol by rectified distillation showed that using a 3 L/h flow rate and 0.3 distillate reflux (1 second closed / 3 seconds open) yielded 350 ± 0.5 mL of distillate with an alcohol content of 22 ± 1°G.L. At the same time, using a reflux of 1 second closed / 1 second open a greater volume of distillate was obtained (450 ± 0.4 mL) with a higher alcohol content of 35 ± 0.4°GL. Statistical analysis evidenced the existence of significant differences between the water: wort ratios evaluated, as well as a high significant difference between the refluxes evaluated in distillation, this being seen in the final distillation volumes (350 ± 0.5, 420 ± 0.2 and 450 ± 0.4 mL) and in the alcoholic degrees (22 ± 1, 30 ± 0.5 and 35 ± 0.4 °GL).

Keywords: Bioethanol, *Musa paradisiaca*, distillation, Wort: Water Ratio, distillate reflux.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción y formulación del problema

Los biocombustibles representan recursos energéticos que el ser humano obtiene a partir de materiales recientemente generados por seres vivos, conocidos como "biomasa". Estos biocombustibles pueden presentarse en forma líquida, sólida o gaseosa, y su principal finalidad radica en liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión. En la actualidad, aproximadamente el 90% de la energía consumida en el mundo proviene de combustibles fósiles y energía nuclear. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que las reservas de combustibles fósiles son finitas y, en mayor o menor medida, tienen un impacto negativo en el medio ambiente debido a su naturaleza contaminante. A partir de mediados del siglo XX, con el aumento de la población, la expansión de la producción industrial y la proliferación de tecnologías, se ha intensificado la preocupación por el agotamiento de las reservas de petróleo y los efectos adversos en el entorno natural. Con este contexto en mente, se ha impulsado el desarrollo de fuentes de energía alternativas basadas en recursos naturales renovables y menos perjudiciales para el medio ambiente. Estas alternativas incluyen la energía solar, las mareas, el agua y, especialmente, los biocombustibles (Lede, 2000).

Entre estos biocombustibles, el bioetanol es una opción que rara vez se menciona en proyectos a nivel nacional, aunque ha demostrado su viabilidad en otras partes del mundo. A lo largo de los últimos 25 años, la producción mundial de bioetanol ha experimentado un constante aumento, con un crecimiento significativo a partir del año 2000. En 2005 y 2006, la capacidad de producción anual a nivel global alcanzó aproximadamente 45 y 49 mil millones de litros, respectivamente. Se proyecta que para el año 2015, la producción total superará los 115 mil millones de litros. Durante un tiempo, Brasil lideró la producción de bioetanol, pero en 2005, Estados Unidos superó a Brasil y se convirtió en el principal productor a nivel mundial. Es relevante destacar que la producción de bioetanol a partir de recursos de biomasa no alimentaria como materia prima es especialmente importante en países con poblaciones numerosas y un crecimiento en el consumo de gasolina, como Brasil, Egipto, China e India. En China e India, por ejemplo, se puede obtener aproximadamente 3.9 millones de litros de etanol a partir de la paja de arroz y el bagazo (Ibrahim. H, 2011).

Los países líderes en la producción de etanol, tales como Estados Unidos, Brasil, Colombia, Argentina y México, han implementado un marco regulador que abarca la producción, utilización y gestión del etanol. Estos países han establecido porcentajes obligatorios para la mezcla de etanol con la gasolina, además de ofrecer incentivos para fomentar su producción (Ibrahim. H, 2011). El banano se presenta como una materia prima ideal para la producción de bioetanol debido a su significativo contenido de carbohidratos, que representa aproximadamente el 20% de su peso total. Estos carbohidratos son aptos para procesos de fermentación destinados a la generación de alcohol, lo que constituye una característica fundamental. Además, en el país se generan anualmente alrededor de 800 mil toneladas de banano de rechazo, así como material lignocelulósico derivado del proceso, como los vástagos y pseudo tallos.

Una de las principales limitantes en la obtención de bioetanol es el consumo energético del proceso, siendo de vital importancia la optimización del ciclo productivo. La alta fermentabilidad que ofrece la pulpa de plátano debe ser acompañada de otros parámetros operativos que garanticen que el potencial energético de este insumo sea adecuadamente aprovechado. Son múltiples las variables estudiadas en el proceso de producción de bioetanol, no obstante, en el presente estudio se ha identificado que las variables concentraciones de las diluciones del mosto generado y ratio de reflujo son vitales para asegurar una alta generación de etanol en el proceso fermentativo y rendimiento del proceso de destilado del bioetanol generado, respectivamente. No obstante, estas variables aún no han sido debidamente estudiadas (Ibrahim. H, 2011).

A pesar de estas condiciones propicias, es importante señalar que la exploración de su utilización para la obtención de biocombustibles aún se encuentra en una etapa incipiente en el Perú. Los proyectos destinados a la reutilización de desechos con el fin de producir biocombustibles están en sus primeras fases de desarrollo en el país. Por lo cual, el presente trabajo planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál será el efecto de la relación mosto: agua y la relación de reflujo sobre la concentración de bioetanol a partir de pulpa de plátano de seda *Musa paradisiaca* empleando *Saccharomyces cerevisiae*?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Determinar los efectos de la relación mosto: agua (20:50; 30:40 y 40:30) y la relación de reflujo (1s cerrado/1s abierto; 1s cerrado/2s abierto; 1s cerrado/3s abierto) sobre la concentración de bioetanol a partir de pulpa de plátano de seda (*Musa paradisiaca*) empleando *Saccharomyces cerevisiae*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la relación volumen de agua: mosto en la fermentación la pulpa de plátano de seda.
- Caracterizar parámetros cinéticos durante fermentación de pulpa de plátano (pH, índice de refracción y Grados Brix (°Bx)) empleando *Saccharomyces cerevisiae*.
- Caracterizar el efecto de la relación de reflujo (segundos de abertura /segundos de cerrado) en la operación de destilación continua del fermentado de pulpa de plátano de seda.
- Determinar rendimiento de bioetanol (%) de la pulpa de plátano y la concentración de bioetanol final (°GL) de la operación de destilación continua.
- Determinar μ , $Y_{X/S}$, $Y_{P/S}$, Q_X y Q_P a partir de la cinética microbiana de *Saccharomyces cerevisiae* para cada relación mosto: agua.

1.3 Formulación de hipótesis

La relación mosto: agua 20:50 y la relación de reflujo 1s cerrado/1s abierto generarán la mayor concentración de bioetanol a partir de pulpa de plátano de seda (*Musa Paradisiaca*) empleando *Saccharomyces cerevisiae*.

1.4 Justificación e importancia

En las últimas dos décadas, los aumentos en el precio del petróleo crudo han suscitado un significativo interés en la producción de combustibles a partir de fuentes renovables mediante procesos biotecnológicos. Un ejemplo notable de esta tendencia es el crecimiento exponencial de la demanda de bioetanol, también conocido como etanol (EtOH), el cual se espera que experimente un marcado incremento en los próximos años. Por otro lado, uno de los objetivos primordiales de la mayoría de los países radica en la preservación del medio ambiente, dado su impacto crucial en la mejora de la calidad de vida tanto en el presente como en el futuro para la humanidad en su conjunto.

Uno de los principales focos de contaminación proviene del sector del transporte, en gran medida debido a las emisiones de gases (dióxido de carbono, monóxido de carbono, etc.) producidos por los vehículos. Para mitigar estos efectos perjudiciales, se están implementando diversos esfuerzos, entre los cuales se encuentra el empleo directo del etanol como combustible o su utilización en mezclas con gasolina, desempeñando el papel de elemento oxigenador. Asimismo, se busca aprovechar los alimentos fermentables de bajo costo, como el plátano, como fuente adicional de materia prima. Esto tiene un doble propósito: aprovechar la abundancia de plátanos disponibles y, al mismo tiempo, reducir la contaminación derivada del uso de combustibles fósiles.

El uso del etanol como aditivo en la gasolina conlleva varias ventajas significativas. En primer lugar, aumenta el contenido de oxígeno en la mezcla, lo que facilita una combustión más completa, reduciendo así las emisiones contaminantes de hidrocarburos parcialmente oxidados. Además, es importante destacar que el etanol no es tóxico y no presenta riesgos para la contaminación de fuentes de agua.

Por lo tanto, la justificación de este estudio se basa en la imperante necesidad de explorar fuentes alternativas para la producción de biocombustibles. En este contexto, se enfoca en la pulpa del plátano de seda, conocida como "*Musa paradisiaca*", debido a su elevado contenido de azúcares, lo que la convierte en una materia prima propicia para someterse a un proceso de fermentación con el fin de obtener etanol. Esta investigación busca contribuir a la implementación de tecnologías que agreguen un mayor valor a los residuos, al tiempo que promueven activamente la reducción de la contaminación ambiental.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Los biocombustibles tienen un largo historial de uso que se remonta a tiempos prehistóricos. Esta categoría abarca conceptualmente recursos como el estiércol, la leña y la yareta (una planta de la familia de las apiáceas que se encuentra en estado silvestre en las zonas rurales y se utiliza por las resinas que contiene). Estos combustibles siguen siendo de gran importancia en las áreas rurales de Perú. Desde una perspectiva legal, todos los mencionados anteriormente son considerados combustibles de biomasa, según Calvo (2006). Los biocombustibles son recursos energéticos que el ser humano procesa a partir de materiales recientemente generados por seres vivos, conocidos como "biomasa". Estos recursos pueden adoptar formas líquidas, sólidas o gaseosas, y su propósito fundamental consiste en liberar la energía almacenada en sus componentes químicos a través de una reacción de combustión. Existen diversas categorías de biocombustibles, y su clasificación se basa en el tipo de insumo o materia prima utilizada, así como en la tecnología empleada en su producción (Álvarez Maciel, 2009).

Una fuente de energía que a menudo recibe escasa atención en los proyectos nacionales, pero que ha demostrado su viabilidad en otras partes del mundo, es la producción de etanol. Desde una perspectiva industrial, el trabajo enfocado en la producción de este compuesto reviste una importancia fundamental. El etanol no solo representa una fuente de energía, sino también una materia prima de gran relevancia en diversas industrias, como la química, farmacéutica, agroalimentaria, entre otras (Álvarez Maciel, 2009).

El concepto de biocombustibles se refiere a aquellos combustibles obtenidos a partir de biomasa. Biomasa, en su sentido más amplio, engloba cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido un origen reciente en procesos biológicos, como plantas o sus subproductos, incluyendo el estiércol. Este término abarca tanto productos de origen vegetal como animal. En la actualidad, se ha adoptado este término para referirse al conjunto de recursos energéticos y materias primas renovables que se derivan de materia orgánica generada a través de procesos biológicos. Por lo tanto, este concepto excluye a los combustibles fósiles y a los productos orgánicos derivados de ellos, a pesar de que también tuvieron su origen biológico en eras pasadas. En la actualidad, podemos identificar diversas categorías de biomasa (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Los biocombustibles o biocarburantes, términos que se utilizan de manera intercambiable, son combustibles en forma líquida o gaseosa que se obtienen a partir de biomasa. La biomasa se refiere a la materia orgánica biodegradable que no se encuentra en estado fósil y que genera energía a través de un proceso de transformación, que puede ser fermentación alcohólica, producción de ácidos grasos o descomposición anaeróbica (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Estos biocombustibles son mayoritariamente empleados en el sector del transporte y se dividen en las siguientes categorías:

- Biodiesel: se produce mediante la reacción de aceites vegetales o grasas animales con alcohol.
- Bioetanol: se obtiene a partir de la fermentación de materia orgánica rica en almidón, como cereales, caña de azúcar y remolacha.
- Biogás: es una mezcla de gases, principalmente metano, formada por la descomposición de materia orgánica (Torres y Carrera, 2010).

La categoría de biocombustibles líquidos engloba una serie de productos de origen biológico que pueden utilizarse como sustitutos de los derivados del petróleo o como aditivos para estos, con el propósito de emplearlos en motores. Estos biocombustibles son aptos tanto para motores de explosión de encendido por chispa, como los del ciclo Otto, como para motores de combustión interna de compresión, como los del ciclo Diesel. La producción de estos productos implica la transformación de materias primas de origen vegetal y resulta en características físico-químicas que se asemejan a las de los combustibles convencionales derivados del petróleo. En algunos países europeos, especialmente en Francia, a esta categoría de compuestos se les denomina "biocarburantes", mientras que la denominación genérica de "biocombustible" se reserva para productos procedentes de la biomasa destinados a aplicaciones térmicas, incluida la generación de electricidad, que forman parte del grupo de los biocombustibles sólidos (Fernandez, Lucas, & Ballesteros, 2000).

El bioetanol de segunda generación, conocido como lignocelulósico, amplía su alcance para incluir una variedad de productos forestales, como bosques de corta rotación y pastos energéticos. El bioetanol puede emplearse en vehículos especialmente adaptados o combinarse con gasolina. Para las mezclas de bioetanol con gasolina que contienen hasta un 10 por ciento de bioetanol, no se requieren modificaciones en los motores.

Estas mezclas, denominadas B5 y B10, respectivamente, son comunes en la actualidad (Dufey, 2006).

El bioetanol, resultado de la fermentación alcohólica de diversos materiales orgánicos mediante la acción de microorganismos, ha vuelto a cobrar gran relevancia debido al incremento en los precios del petróleo. En la actualidad, el enfoque principal de la investigación se centra en la búsqueda de materias primas asequibles que puedan reemplazar a las convencionales y ricas en azúcares. Este cambio busca lograr una mayor eficiencia en los procesos de fermentación, recuperación y purificación del alcohol producido. En este artículo, la autora explora los fundamentos técnicos y científicos relacionados con la producción de bioetanol, al tiempo que reflexiona sobre las tendencias actuales. Además, se aborda el equilibrio en medio de la discusión existente sobre la competencia entre la producción de alimentos y la generación de recursos energéticos (Hernandez Nodarse, 2007).

El bioetanol puede producirse a partir de fuentes de azúcares simples como la caña de azúcar, la remolacha azucarera y la melaza, o a partir de otros carbohidratos que pueden convertirse en azúcar, como el almidón y la celulosa. Las materias primas ricas en almidón incluyen el maíz, las patatas, entre otros, mientras que los materiales celulósicos abarcan la madera, los desechos forestales, los residuos agrícolas, los restos de cultivos, entre otros. Sin embargo, la producción de bioetanol a partir de cereales y vegetales azucarados como la remolacha limita su uso en países en desarrollo debido a las crisis alimentarias que pueden surgir. Por este motivo, los investigadores han comenzado a buscar métodos adecuados para obtener bioetanol a partir de materias primas no comestibles, como los residuos forestales, la madera y los tallos de las plantas, entre otros (Dulari. H et al., 2013).

El bioetanol tiene un alto índice de octano y, por lo tanto, se utiliza directamente en motores de encendido por chispa (SI). Sin embargo, los motores de encendido por compresión (CI) son preferidos en lugar de los motores SI debido a su mayor eficiencia térmica y robustez estructural. No obstante, el bioetanol no puede utilizarse directamente en motores de encendido por compresión debido a su bajo índice de cetano. Para superar este desafío, se pueden emplear diferentes enfoques, como la modificación del combustible mediante la creación de soluciones, mezclas o emulsiones con un combustible de alto índice de cetano, o la realización de modificaciones

necesarias en el motor, como la implementación de sistemas de doble combustible y la ignición en superficie (Dulari. H et al., 2013).

El plátano ostenta la posición de cuarto cultivo más relevante en el mundo, después del trigo, el arroz y el maíz. Este fruto se cosecha en más de 130 países situados en la región tropical de los cinco continentes. En América Latina, varios híbridos y especies pertenecientes al género *Musa*, dentro de la familia *Musaceae*, son conocidos coloquialmente como "plátano" o "banano". La producción global de plátano alcanza alrededor de 106,7 millones de toneladas anuales, y los principales productores a nivel mundial son Guatemala, Colombia, Filipinas, Costa Rica y Ecuador. Es esencial destacar que el plátano se clasifica como una fruta sumamente perecedera, lo que conduce a la eliminación de grandes cantidades de este producto en vertederos debido a su incapacidad para cumplir con las estrictas normas de exportación. De hecho, aproximadamente entre el 24% y el 40% del plátano no llega al mercado y se deja en el campo hasta que se descompone. No obstante, el plátano ha sido objeto de investigación como materia prima potencial para la elaboración de productos de alto valor añadido. Además, se ha explorado su aplicación en la producción de alimentos de bajo costo, como alimento para animales, harina y biogás (Alonso-Gómez et al., 2020).

La industria de producción de bioetanol ha estado explorando el uso de materias primas económicas, y una de las alternativas más prometedoras es la utilización de residuos de plátano, como la pulpa y las cáscaras. La incorporación de estos residuos de plátano como materia prima tiene el potencial de atenuar el impacto que se genera en vertederos sanitarios o campos de cultivo debido a su acumulación. Además, los residuos de plátano poseen un contenido energético que puede ser transformado en productos energéticos como el biogás y el bioetanol, así como en productos de alto valor añadido. No obstante, es crucial evaluar cuidadosamente los requisitos energéticos del proceso, la viabilidad económica y la escala de procesamiento antes de considerar la implementación de una planta de producción, como se señala en el estudio de Alonso-Gómez et al (2019).

Diversos autores han estudiado la formación de bioetanol utilizando residuos de plátano como materia prima mediante distintos métodos. El autor Agwa et al (2017) reportó una formación de bioetanol de hasta 10.82% v/v utilizando cultivos de *Chlorella vulgaris* suplementados con residuos de cascaras de plátano como materia prima. El autor Bilyartinus & Siswanto (2021) obtuvo hasta un 6% de etanol utilizando cultivos de

Bacillus subtilis, este mismo autor sugiere una relación mediante una ecuación lineal ($y = -0.4643 + 6.7143x$) donde la presencia de un gradiente negativo sugiere una relación inversa donde a mayor densidad se obtiene una menor cantidad de bioetanol. El autor Alonso-Gómez et al (2019) reportó un rendimiento de sustrato a bioetanol de ($Y_{p/s}$) de 0.75 y velocidad específica de crecimiento (μ) 0.57 utilizando *Saccharomyces cerevisiae*. Estos autores coinciden en que el proceso de producción de bioetanol debe de ser optimizado según las condiciones de operación y microorganismo empleados.

El proceso químico para la producción de bioetanol se basa en una fermentación, una transformación química de sustancias orgánicas llevada a cabo mediante la acción de enzimas. Durante la fermentación, las sustancias orgánicas complejas se convierten en otras más simples, como señala Perotti (2011).

El banano se presenta como una materia prima idónea para la obtención de bioetanol debido a su elevado contenido de carbohidratos, aproximadamente un 20% de su peso total. Estos carbohidratos son adecuados para procesos de fermentación dirigidos a la producción de alcohol, una característica que se vuelve aún más relevante dado que en el país se generan anualmente aproximadamente 800 mil toneladas de banano de rechazo y material lignocelulósico derivado del proceso, incluyendo el vástago y el pseudotallo. Actualmente, una tercera parte de la fruta no exportada se destina al consumo interno, otra tercera parte se emplea como materia prima para la producción de fertilizantes orgánicos (compost) destinados al cultivo de la misma fruta, mientras que la última tercera parte continúa siendo considerada como residuo. Precisamente estos dos últimos tercios de residuo tienen un potencial significativo para ser utilizados en procesos de fermentación alcohólica, tal como se menciona en el estudio de Pelaez & Zapata (2010).

El autor Oyeyinka & Afolayan (2019) caracterizó la composición de la pulpa de plátano de diversas variedades, donde se describió que la pulpa de plátano de *M. paradisiaca* presenta un contenido de humedad 20.92%, lípidos 0.24%, ceniza 0.78%, fibra 10.24%, proteína 1.22%, carbohidratos 66.60% y un valor energético de 273.44, lo cual destaca su alta fermentabilidad para la obtención de bioetanol. Como parte de los procesos de elaboración de bioetanol, el extracto generado a partir de la fuente de carbono es diluido para mejorar la rentabilidad del proceso y generar condiciones que sean más propicias para el microorganismo fermentador. Asimismo, una matriz líquida proporciona un medio más fácil de monitorear en comparación a otros tipos de fermentaciones como en

sustrato sólido por citar un ejemplo (Brexó & Sant'Ana, 2017). Las concentraciones de las diluciones varían significativamente entre las diversas publicaciones científicas, pudiéndose expresar en ratios (A: B %v/v, Dziugan et al. 2013), grados Brix (Calegari et al. 2023), gramos de azúcares fermentables por litro (Douradinho et al. 2023), entre otros. La producción de bioetanol finaliza con el proceso de destilación, que permite la separación de las mezclas líquidas para obtener mayores concentraciones de bioetanol. La destilación se realiza con la vaporización y posterior condensación del mosto fermentado, que originalmente presenta 7-12% en volumen de etanol, y 88-93% en volumen de agua. Un proceso de purificación es de fundamental importancia, ya que el mosto fermentado también puede contener glicerol, alcoholes superiores, furfural, aldehído acético, ácidos y sólidos como fragmentos de caña de azúcar, azúcares no fermentables y gases como CO₂ y SO₂ (Brexó & Sant'Ana, 2017). El proceso de destilación implica la transferencia de masa y la separación basada en las diferencias en las temperaturas de ebullición y en la energía como fuerzas impulsoras a través de la vaporización de una mezcla líquida de sustancias miscibles y volátiles en componentes individuales. La destilación continua se inició a finales de la década de 1820 para aumentar el rendimiento de los alambiques en Escocia, donde una mezcla se introduce continuamente en el proceso y las fracciones separadas se eliminan continuamente como flujos de salida. Un parámetro de estudio en la destilación es la posición de la columna y la relación de reflujo para optimizar las condiciones de operación y mejorar la producción de bioetanol. El ratio de reflujo permite incrementar el rendimiento del etanol generado a partir de cuanto volumen del destilado ingresa a la columna sin aumentar el uso del recalentador y el condensador (Tgarguifa et al. 2017).

Hasta la fecha, en el Perú, los estudios de obtención de biocombustibles están en una etapa temprana y aún se desconocen muchos de los parámetros operativos necesarios para la obtención de bioetanol a partir de pulpa de plátano, por lo cual, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar los efectos de la relación mosto: agua y la relación de reflujo sobre la concentración de bioetanol a partir de pulpa de plátano de seda (*Musa paradisiaca*).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Glucólisis

La glucólisis es una vía metabólica y una fuente de energía que ha evolucionado en casi todos los tipos de organismos. En última instancia, la glucólisis divide la glucosa en dos

moléculas de piruvato. Se puede pensar que la glucólisis tiene dos fases que ocurren en el citosol de las células. La primera fase es la fase de "inversión" debido al uso de dos moléculas de ATP, y la segunda es la fase de "ganancia". Cada una de estas reacciones está catalizada por su propia enzima, siendo la fosfofructocinasa la más esencial para su regulación, ya que controla la velocidad de la glucólisis. La glucólisis es un proceso que ocurre tanto en ambientes aeróbicos como anaeróbicos. En un entorno aeróbico, el piruvato ingresa al ciclo del ácido cítrico (ver Figura 1) y experimenta una fosforilación oxidativa que resulta en la generación de un total de 32 moléculas de ATP como producto neto. En cambio, en situaciones anaeróbicas, el piruvato se transforma en lactato mediante la glucólisis anaeróbica. La respiración anaeróbica produce 2 moléculas de ATP (Chaudhry & Varacallo, 2022).

La glucosa es un azúcar hexosa, lo que significa que es un monosacárido con seis átomos de carbono y seis átomos de oxígeno. El primer carbono tiene un grupo aldehído unido, y los otros cinco carbonos tienen un grupo hidroxilo cada uno. En el transcurso de la glucólisis, la glucosa se descompone en piruvato, liberando energía, y como resultado de este proceso se generan un total de 2 moléculas de ATP. El proceso puede resumirse mediante la siguiente ecuación (Chaudhry & Varacallo, 2022).

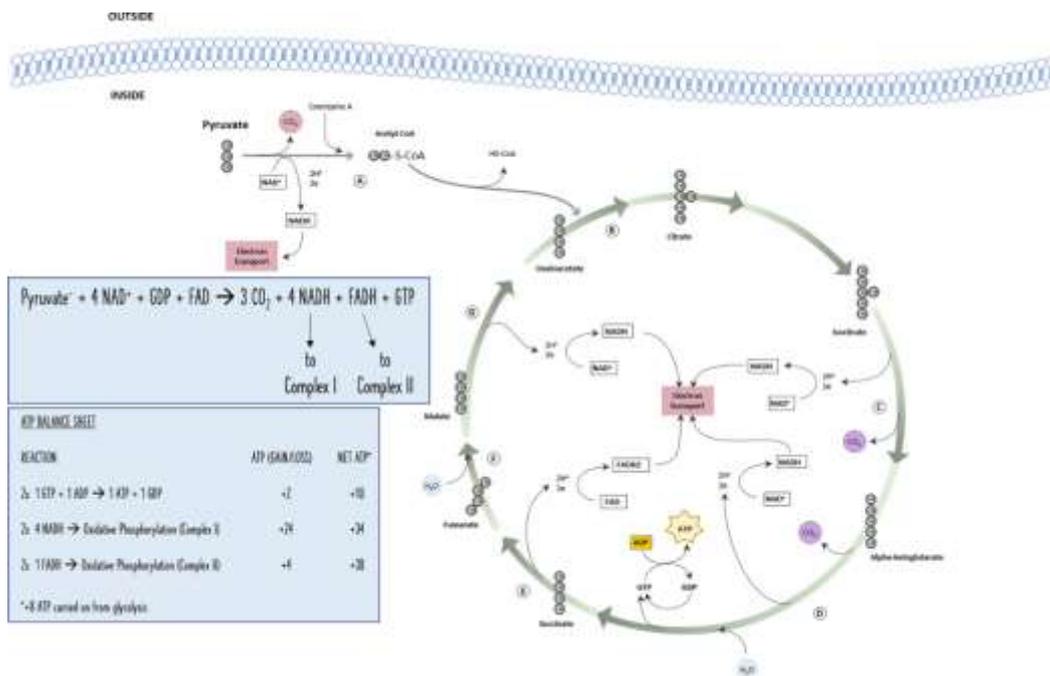
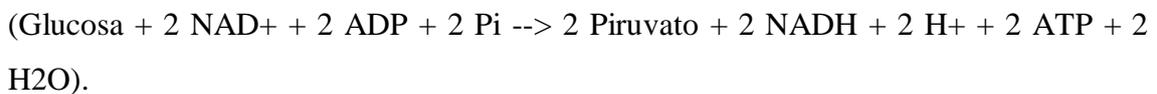


Figura 1. Representación gráfica del ciclo de Krebs según Williams (2022).

2.2.2 Fermentación

La fermentación se puede definir como un proceso de generación de energía en el que se utiliza un aceptor endógeno de electrones, derivado de la oxidación bacteriana enzimática de diversos materiales orgánicos. Los resultados de la fermentación varían en función del sustrato orgánico, que suele ser, con mayor frecuencia, carbohidratos o proteínas, del catalizador empleado, ya sea en forma de enzima aislada o a través del microorganismo que lo produce, y también dependen de las condiciones específicas del proceso. El carácter del proceso puede ser principalmente aeróbico o anaeróbico. Los diferentes modos de fermentación de los hidratos de carbono incluyen la fermentación del etanol, el ácido láctico, el ácido butanoico, el ácido cítrico y la acetona, y la respiración aeróbica que produce CO₂ también debe incluirse en el ámbito de las fermentaciones a partir de la glucosa (Tomasik & Horton, 2012).

Otros tipos de fermentación, como la fermentación del ácido acético, la fermentación del ácido propanoico y las fermentaciones de ácidos mixtos, incluidos los ácidos butanoico y decanoico, el butanol y las fermentaciones del glioxalato, no utilizan directamente la glucosa, sino productos de su transformación. Además de estos productos, la fermentación del almidón puede aportar otros compuestos diversos, como aminoácidos, antibióticos, vitaminas, factores de crecimiento y enzimas (Tomasik & Horton, 2012).

2.2.3 Fermentación del etanol

La fermentación alcohólica es un proceso biotecnológico llevado a cabo por levaduras, ciertos tipos de bacterias y otros microorganismos para transformar azúcares en alcohol etílico y dióxido de carbono. En este proceso, las levaduras se utilizan principalmente como biocultivos, y las soluciones acuosas de monosacáridos, que actúan como materias primas, se emplean como medios de cultivo para la producción de bebidas. Durante la fermentación alcohólica, las levaduras suelen llevar a cabo la fermentación en condiciones aeróbicas, aunque también pueden realizarla en condiciones anaeróbicas cuando no hay oxígeno disponible. En la ausencia de oxígeno, la fermentación alcohólica tiene lugar en el citosol de las levaduras (Sablayrolles, 2009; Stanbury et al., 2013). El proceso de fermentación alcohólica se inicia con la descomposición de los azúcares por parte de las levaduras, lo que se conoce como glucólisis. La glucólisis de una molécula de glucosa da como resultado la formación de dos moléculas de ácido

pirúvico. Posteriormente, estas dos moléculas de ácido pirúvico se reducen para producir dos moléculas de etanol y dos CO₂.

En ambientes carentes de oxígeno, el piruvato tiene la capacidad de transformarse en etanol. En primer lugar, se convierte en un compuesto intermedio denominado acetaldehído, el cual libera dióxido de carbono. Posteriormente, el acetaldehído se convierte en etanol. En el contexto de la fermentación alcohólica, el NAD⁺, un aceptor de electrones, se reduce para dar lugar al NADH. Esta transferencia de electrones que se produce en el proceso contribuye a la síntesis de ATP. Puedes encontrar una representación visual de este proceso en la Figura 2 (Malakar et al., 2019).

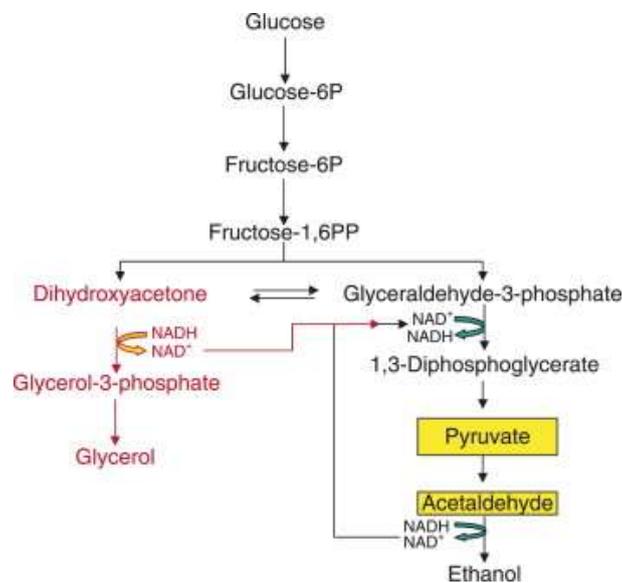


Figura 2. Esquema simplificado de la ruta metabólica de la fermentación alcohólica según Tomasik & Horton (2012).

2.2.4 Destilación

La destilación es un proceso que implica la separación de componentes o sustancias dentro de una mezcla líquida, haciendo uso de la selectiva ebullición y condensación. Este procedimiento puede llevar a una separación prácticamente completa, obteniendo componentes casi puros, o puede tratarse de una separación parcial que incrementa la concentración de componentes específicos en la mezcla. En ambos casos, el proceso se basa en las variaciones de volatilidad entre los componentes de la mezcla. En el ámbito de la química industrial, la destilación se considera una operación unitaria de relevancia prácticamente universal; sin embargo, es importante destacar que se trata de un proceso de separación física y no de una reacción química (Green, 2005).

La aplicación de la destilación puede ser agrupada de manera aproximada en cuatro categorías distintas:

- Escala de laboratorio.
- Destilación industrial.
- Destilación de hierbas para perfumería y medicamentos.
- Procesamiento de alimentos.

Los dos últimos grupos se diferencian claramente de los dos primeros en cuanto a que la destilación no se utiliza principalmente como un método de purificación, sino más bien como un medio para transferir todos los compuestos volátiles de los materiales originales al destilado, especialmente en la producción de bebidas y extractos de hierbas (Green, 2005).

La principal distinción entre la destilación a nivel de laboratorio y la destilación industrial radica en el hecho de que la destilación de laboratorio suele llevarse a cabo de manera discontinua, mientras que la destilación industrial se realiza de forma continua en la mayoría de los casos. En la destilación discontinua, durante el proceso de destilación, la composición de los materiales originales, los vapores de los compuestos destilados y el destilado mismo cambian a lo largo del tiempo. En el método de destilación por lotes, se carga un alambique con un lote de la mezcla de alimentación, que luego se separa en sus diferentes fracciones componentes. Estas fracciones se recogen en secuencia, desde la más volátil hasta la menos volátil, con la fracción mínima o no volátil restante eliminada al final. El alambique puede recargarse y el proceso repetirse en múltiples ocasiones (Green, 2005).

En contraste, en la destilación continua, se mantiene una composición constante de los materiales originales, los vapores y el destilado. Esto se logra llenando cuidadosamente el material de origen y eliminando constantemente las fracciones tanto del vapor como del líquido en el sistema. Este enfoque permite un control más preciso del proceso de separación (Green, 2005). El esquema de un destilador de laboratorio es representado en la Figura 3.

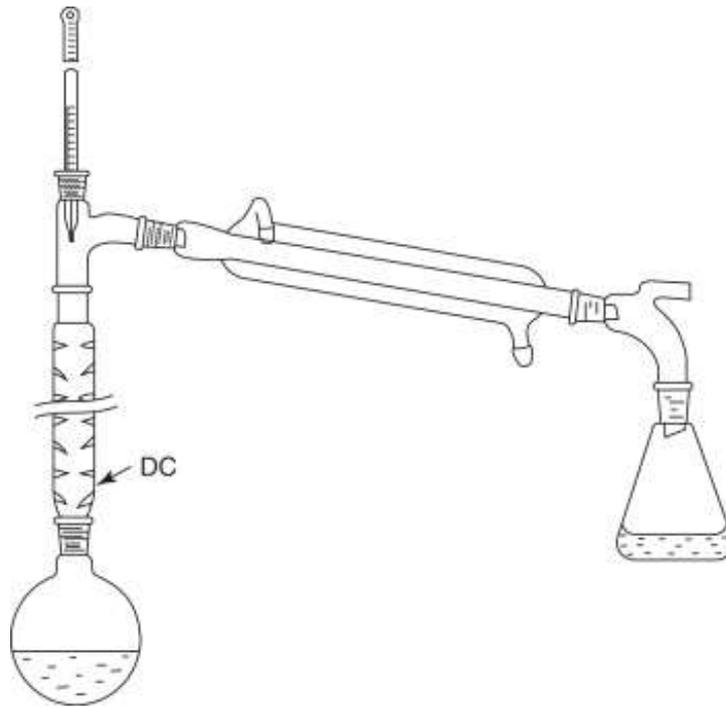


Figura 3. Esquema de un destilador de columna de laboratorio según Green (2005).

2.2.5 Ratio de reflujo

La relación de reflujo se define como la proporción entre la tasa de ebullición y la tasa de destilación, es decir, representa la relación entre la cantidad de líquido que desciende por la columna de destilación y la cantidad de líquido que se recoge en el recipiente, que es el producto destilado. La finalidad del reflujo es hacer que el líquido que fluye hacia abajo a lo largo de la sección de rectificación entre en contacto con el vapor que fluye hacia arriba para lograr una transferencia de calor y masa de equilibrio etapa por etapa y, por lo tanto, la purificación del producto sea superior. Cuando se introduce reflujo subenfriado en la bandeja superior del destilador, debe calentarse hasta su punto de burbuja (temperatura a la que el líquido empieza a hervir) antes de que se vaporicen los componentes más ligeros. Cuando el vapor se condensa, se añade al líquido total que fluye desde la bandeja hacia abajo por la columna. En otras palabras, un reflujo subenfriado introduce un mayor volumen (o masa o molar) de flujo de reflujo que el suministrado a la columna por el controlador externo de flujo de reflujo (Digieneni et al., 2019).

2.2.6 Biocombustibles

Los biocombustibles constituyen una fuente de energía renovable que puede utilizarse como combustible para el transporte, ya sea directamente o mezclados con combustibles

fósiles convencionales. En una definición inicial, podemos considerar a los biocombustibles como alternativas a los combustibles fósiles. En el año 2015, los biocombustibles empleados en el sector del transporte constituyeron aproximadamente el 4% del total de combustibles utilizados a nivel mundial en el transporte por carretera. En el contexto del transporte por carretera, podemos distinguir principalmente dos tipos de biocombustibles: aquellos que reemplazan a la gasolina y los que sustituyen al diésel (Palandri et al., 2019).

Los biocombustibles suelen dividirse en cuatro categorías o "generaciones" (Tabla 1). El biogás, el etanol y el biodiésel se clasifican como biocombustibles de "1ª generación". Dado que se extraen de la biomasa, estos biocombustibles de "1ª generación" han sido criticados en repetidas ocasiones por las implicaciones para la sostenibilidad de su creciente escala de producción, especialmente por cuestiones como los cambios en el uso del suelo; la competencia por los alimentos, el agua dulce y la tierra; la deforestación y el coste de producción. En respuesta a estas críticas, se han desarrollado los biocombustibles de "nueva generación" o "avanzados". Estos son vistos más favorablemente por el *establishment* político y de investigación, ya que pueden abordar algunos (pero no todos) de los problemas de sostenibilidad atribuidos a la producción de los biocombustibles de "1ª generación". Estos biocombustibles avanzados tienen potencial para convertirse en una tecnología comercialmente viable en el transporte en los próximos 15 años aproximadamente. A pesar de ello, es probable que los biocombustibles de 1ª y 2ª generación sigan siendo los principales combustibles para el transporte a corto plazo (Filimonau, 2018).

Tabla 1. Generaciones de biocombustibles según Filimonau (2018).

Generación	Materia prima	Ejemplos de materias primas
1	Biomasa de cultivos tradicionales alimentarios y no alimentarios, grasa animal	Caña de azúcar, maíz, soja, girasol
2	Biomasa alternativa de cultivos no alimentarios, biomasa de desecho, residuos agrícolas y forestales, cultivos y plantas biocombustibles de alto rendimiento energético.	Tallos y hojas de maíz, jatrofa, switchgrass, aceite de palma, colza
3	Biomasa mejorada de cultivos no alimentarios, cultivos y plantas oleaginosos y de crecimiento más rápido, algas	Tipos de maíz y álamo modificados genéticamente, microalgas
4	Mejora, biomasa de cultivos no alimentarios, microbios	Tipos de maíz y álamo modificados genéticamente, microalgas cuyo crecimiento se ve facilitado por el metabolismo microbiano

2.2.7 Bioetanol

El bioetanol se ha establecido como una alternativa ampliamente reconocida a los combustibles fósiles con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Hasta la fecha, la producción de bioetanol se basa principalmente en cultivos destinados a la alimentación, lo que tiene un impacto en una variedad de aspectos relacionados con la agricultura, incluyendo la demanda local y las exportaciones, la fluctuación de precios y la asignación de tierras para diferentes cultivos. Esto ha generado inquietudes sobre la sostenibilidad del bioetanol derivado de cultivos alimentarios. En la actualidad, se están llevando a cabo numerosos esfuerzos para evaluar la sostenibilidad ambiental del bioetanol. Las emisiones de GEI y los costos de producción dependen de factores como la materia prima, el tamaño de la planta, la utilización de subproductos y los procesos de producción. La implementación de enfoques basados en la simbiosis industrial y la economía circular puede contribuir a mejorar tanto la sostenibilidad económica como la ambiental del bioetanol. No obstante, es fundamental establecer regulaciones adecuadas para la producción de bioetanol a partir de cultivos destinados a la alimentación con el fin de garantizar la seguridad alimentaria. Además, es necesario llevar a cabo un análisis exhaustivo de los límites y fronteras para mitigar los posibles riesgos económicos y ambientales asociados con esta producción (Filimonau, 2018).

El bioetanol se produce a partir de la biomasa mediante la fermentación de los hidratos de carbono disponibles, normalmente azúcares simples, en bioetanol y dióxido de carbono, a través del siguiente proceso químico:



La mayoría de las moléculas de carbohidratos ((CH₂O)_n) tienen potencial para producir bioetanol; sin embargo, las principales fuentes para la producción actual de bioetanol son el azúcar, el almidón, la celulosa y la hemicelulosa. Durante la hidrólisis microbiana, estos polímeros de carbohidratos se descomponen en azúcares simples y, posteriormente, se fermentan para producir bioetanol (Paniagua-Michel, 2015).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Análisis Físico-químico de la pulpa de plátano de seda (*Musa paradisiaca*)

La data recopilada de diversos trabajos de investigación previos fue utilizada como base para determinar las propiedades físico-químicas de interés para el presente trabajo.

3.2 Generación de unidades experimentales

Para la generación de las unidades experimentales se realizó los siguientes procedimientos:

- **Recepción de la pulpa de plátano de seda variedad “*Musa paradisiaca*”**

Se colectó pulpa de plátano proveniente del Mercado mayorista la Perla. Las muestras fueron llevadas al laboratorio.

- **Pesado**

Una vez que las muestras llegaron al laboratorio, se procedió con el pesado de las cantidades experimentales de pulpa de plátano de seda a utilizar.

- **Extracción de la pulpa de Plátano de seda maduro**

Con la ayuda de un cuchillo se realizó la extracción de la pulpa de plátano maduro, procurando obtener la mayor cantidad posible de pulpa.

- **Triturado y licuado de la pulpa de Plátano de Seda**

Este proceso se realizó con la ayuda de un mortero y luego se licuó, obteniéndose los residuos fermentables en forma líquida.

- **Filtración de la pulpa de Plátano de Seda**

Este proceso se realizó con la ayuda de un colador, con la finalidad de eliminar las fibras que contenía y así obtener un mosto homogéneo.

- **Esterilizado de la pulpa de Plátano de Seda**

Se depositó el mosto de pulpa de plátano obtenido en envases plásticos con una capacidad de 20 litros, los cuales fueron previamente sanitizados con agua caliente, jabón y alcohol. Para garantizar la esterilidad del mosto se agregó metabisulfito de sodio a una concentración de 0.09 gr/L como desinfectante para los bidones y envases empleados. Se realizó un curado por agitación previo de los envases de plástico mediante el vertido de 500 ml de mosto tratado con metabisulfito; el metabisulfito tiene la función de prevenir el crecimiento de bacterias, levaduras u hongos extraños a los usados en el experimento.

3.3 Determinación de las condiciones Óptimas de Fermentación.

Con el propósito de determinar las condiciones óptimas para la fermentación del mosto y las etapas posteriores, como la filtración y la destilación, se llevaron a cabo experimentos utilizando diferentes proporciones de agua añadida al mosto. La concentración de levadura utilizada en estos experimentos fue del 1 g/L.

En la Tabla 2, se muestra la nomenclatura empleada para identificar los distintos sistemas con los que se experimentó durante la búsqueda de las condiciones óptimas para la fermentación del mosto de Plátano de Seda, con el objetivo de producir etanol.

Tabla 2. Relación P-A (mosto: agua).

SISTEMAS	CANTIDAD DE LEVADURA	VOLUMEN DE MOSTO: AGUA
A	1g/L	20:50
B	1g/L	30:40
C	1g/L	40:30

Se evaluaron tres concentraciones experimentales para de proporción mosto: agua para la etapa de fermentación: 20:50; 30:40 y 40:30 %v/v.

Luego, cada mezcla se transfirió al recipiente de fermentación, que estaba hecho de plástico. A cada mezcla se le añadió 1 g/L de levadura de pan (*Saccharomyces cerevisiae*) como microorganismo fermentador.

Después, se procedió a airear la mezcla experimental de cada sistema a través de agitación durante un período de dos horas. Este proceso tenía como objetivo incrementar la concentración de oxígeno disuelto en el medio, un factor esencial para el desarrollo óptimo de las levaduras.

3.4 Fermentación del mosto.

La unidad experimental (bidones conteniendo 7 litros de mezcla de mosto: agua en las proporciones de 20:50, 30:40 y 40:30) se mantuvieron a la temperatura de 29 °C, siendo el intervalo de temperatura optima de *Saccharomyces cerevisiae* entre 28 a 35°C. Se estableció un tratamiento control el cual contó de una proporción de 35:35 de mosto: agua elaborada bajo las mismas condiciones que los tratamientos experimentales. A lo largo de la fermentación del mosto, se tomaron muestras a ciertos intervalos de tiempo a las cuales se les aplicaron los siguientes análisis:

- **Cuantificación de formación de biomasa de *Saccharomyces cerevisiae***

Se extrajo una alícuota de 5 mL de la unidad experimental, la cual se centrifugó a 5 000g durante 20 min y se conservó el sobrenadante para la cuantificación de azúcares totales. El precipitado de biomasa se colocó en un capacho de aluminio previamente pesado y se secó en una estufa a 80 °C por 24 h. Luego, se pesó el capacho con biomasa y se determinó la concentración biomasa (Srikanth et al., 2014).

- **Cuantificación de consumo de azúcares totales en el mosto**

Para determinar de la concentración de azúcares totales, primero se hidrolizó la sacarosa del medio de cultivo y luego se empleó la técnica del DNS, asumiendo que la mayor fuente de azúcares que tiene el mosto de plátano de seda es la sacarosa. Para ello, primero se tomó 1 mL del sobrenadante de caldo de cultivo; a continuación, se diluyó convenientemente, y 1 mL de cada dilución se mezcló con

0.1 mL de ácido clorhídrico concentrado, para después disponer los tubos en un baño a 60 °C durante 10 min; luego se retiraron los tubos del baño y se les agregó 0.9 mL de hidróxido de sodio 1.7 N para neutralizar la reacción; de lo anterior se tomó 250 µL y se le agregó 250 µL de la solución de DNS, posteriormente se taparon los tubos y dispusieron en un baño a ebullición durante 5 min; luego se retiraron los tubos y se colocaron en un baño de hielo para después agregarles 2.5 mL de agua destilada a cada tubo; como siguiente paso, se midió la absorbancia de cada muestra a 540 nm usando como blanco la solución de DNS con sólo agua destilada; por último, los valores obtenidos de absorbancia se interpolaron en la curva de calibrado de sacarosa (Miller, G., 1959).

- **Determinación de pH**

Se determinó el pH en las muestras utilizando un potenciómetro portátil marca Hanna Instruments, el cual fue previamente calibrado con soluciones amortiguadoras de pH 4.00 y 7.00. Para cada una de las lecturas se introdujo el electrodo en la muestra cuya temperatura fue programada entre 20-25 °C. Se registró un valor de pH a cada una de las muestras expresados a dos lugares decimales.

- **Determinación de los Grados Brix**

Los grados brix fueron determinados utilizando un refractómetro ABBE, hecho en Polonia, N.º: 25790/91, el cual fue previamente calibrada con agua destilada. Para cada una de las lecturas se introdujo la muestra entre dos prismas. Se registró un valor de grados brix, para cada una de las muestras, expresados a un lugar decimal.

- **Determinación del Índice de Refracción**

Se determinó el índice de refracción en las muestras utilizando un refractómetro ABBE, fabricado en Polonia, con el número de serie 25790/91, que previamente fue calibrado con agua destilada. En cada lectura, se colocó la muestra entre dos prismas y se registró el valor del índice de refracción con una precisión de cuatro decimales para cada una de las muestras.

- **Determinación de la densidad**

La densidad de las muestras se determinó mediante el método del picnómetro. Para cada una de los análisis las muestras fueron previamente destiladas, según la NTP 212.030 2009, 60% del volumen de muestra original.

- **Determinación de los Grados Alcohólicos por picnometría.**

Los grados alcohólicos se determinaron siguiendo el estándar UNIT 184-70 para Bebidas Alcohólicas mediante el método convencional de picnometría. Este método se utiliza para calcular tanto la densidad como la densidad relativa, y se describe detalladamente a continuación:

- **Peso vacío de aire (G0).**

El peso del picnómetro vacío de aire (G0) se define como el peso (Ga) del picnómetro limpio y seco, lleno de aire, después de restar la masa de aire que contiene. La masa del aire (Gm) se obtiene multiplicando la densidad del aire por el volumen del picnómetro. En condiciones típicas de temperatura y presión, se puede considerar que la densidad del aire es de aproximadamente 0,0012 g/mL.

Para calcular Gm, se puede tomar en cuenta que el volumen del picnómetro es igual al resultado de restar Ga1 a Gb, donde Gb es el peso del picnómetro lleno de agua, obtenido durante la determinación de la masa del picnómetro a la temperatura T°C. Por lo tanto, la relación se establece de la siguiente manera:

$$G0 = Ga - Gm$$

$$\text{Siendo } Gm = 0,0012 (Gb - Ga)$$

Fórmula para la determinación de peso de vacío de aire según Vigo & Barrera Chiroque (2015).

- **Volumen a 20°C (V20)**

El volumen del picnómetro a 20°C se calculó utilizando el peso (Gb) del picnómetro lleno con agua libre de dióxido de carbono y ajustando al nivel en la temperatura t°C. La medición de esta temperatura debe realizarse con una

precisión de $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$. La masa (M_t) de agua contenida en el picnómetro a la temperatura $t^{\circ}\text{C}$ se calcula de la siguiente manera:

$$M_t = G_b - G_0$$

Al multiplicar M_t por el factor F , que se obtiene de la tabla I de "Recopilación de los métodos internacionales de análisis de vinos" de la O.I.V. (1979) y que resulta de la inversa de la densidad del agua a $t^{\circ}\text{C}$ multiplicada por la relación entre los volúmenes del picnómetro a 20°C y a $t^{\circ}\text{C}$, se obtiene el volumen del picnómetro a 20°C .

Luego de completar la fermentación del mosto, se procedió a medir la concentración final de etanol en cada uno de los tratamientos investigados, así como a calcular el rendimiento de etanol. Esto se hizo con el propósito de identificar las condiciones óptimas de fermentación en relación con la cantidad de agua añadida al mosto. Una vez determinado el tratamiento más eficaz, se realizó el proceso de filtración y, posteriormente, se llevó a cabo la destilación.

3.5 Destilación del mosto

- **Determinación de la masa volumétrica aparente del destilado**

Se procedió a calcular el peso G_c del picnómetro con el destilado. La masa G_t del destilado que se encuentra dentro del picnómetro a la temperatura $t^{\circ}\text{C}$ se determinó de la siguiente manera:

$$G_t = G_c - G_0$$

Fórmula para determinación de masa volumétrica aparente según Vigo & Barrera Chiroque (2015).

La masa volúmica aparente, representada como ρ_t (g/ml), se calcula como la relación entre G_t y V_{20} . Una vez que se conoce la masa volúmica aparente a la temperatura $t^{\circ}\text{C}$, se determinó el porcentaje de alcohol en volumen del destilado a 20°C utilizando las tablas ubicadas en las páginas 52 a 63 de "Recopilación de los métodos internacionales de análisis de vinos" de la O.I.V. (1979).

- **Metodología para la Puesta a Punto del Sistema de Utilización de la Unidad de Destilación Continua bajo Presión Reducida.**

- Cerrar las válvulas V_2 , V_3 , V_6 , V_8 , V_{14} , V_{12} , V_{15} y V_9 .

- Abrir las válvulas V1, V5, V7, V10, V11 y V13.
 - Llenar el depósito D1 con una mezcla binaria de agua y alcohol al 96°.
 - Conectar la instalación a la red eléctrica.
 - Colocar el conmutador AUTO/MAN/PC en la posición MAN.
 - Activar el interruptor AUTO-DIFF.
 - Presionar el botón "Start".
 - Conectar la descarga de agua al sistema de desagüe.
 - Conectar la instalación a la red de suministro de agua y ajustar el caudal a 150 l/h mediante la válvula V6.
 - Iniciar la bomba dosificadora G1 con el conmutador en la posición 1.
 - Llenar la caldera hasta cubrir completamente la resistencia eléctrica.
 - Detener la bomba G1.
 - Colocar el conmutador de "regulación del recalentamiento" en la posición 0.
 - Colocar el conmutador de "regulación del reflujo" en la posición 0.
 - Llenar el separador S1 con hielo seco para evitar la entrada de vapores en la bomba G2.
 - Iniciar la bomba de vacío G2 con el conmutador en la posición 1.
 - Controlar la presión utilizando la válvula V12.
- **Procedimiento para Iniciar el Sistema de Utilización de la Unidad de Destilación Continua bajo Presión Reducida.**
 - Colocar el conmutador "regulación del recalentamiento" en la posición 1.
 - Girar el potenciómetro de la resistencia eléctrica en sentido horario.
 - Establecer el valor deseado para la presión residual.
 - Llevar la solución a ebullición.
 - Mantener la columna en reflujo total durante aproximadamente 5 minutos.
 - Iniciar la bomba G1.
 - Establecer la tasa de alimentación, por ejemplo, a 1 L/h.
 - Configurar el temporizador "START" en 2 segundos.
 - Configurar el temporizador "STOP" en 20 segundos.
 - Colocar el conmutador "regulación del reflujo" en la posición 1 para aumentar o disminuir la alimentación, lo que variará el número de impulsos de la bomba G1.

- Para ajustar la razón de reflujo, modificar los tiempos de intervención de los temporizadores en la válvula electromagnética EV1.
- Para tomar una muestra del destilado, seguir estos pasos: cerrar las válvulas V7 y V10, abrir la válvula V8, tomar una probeta Erlenmeyer y descargar el contenido del depósito D2 abriendo la válvula V9. Para restablecer el vacío, cerrar las válvulas V9 y V8, y abrir las válvulas V10 y V7.
- Para tomar una muestra del producto final de la columna, seguir estos pasos: cerrar las válvulas V5 y V13, abrir la válvula V14, tomar una probeta Erlenmeyer y descargar el producto del depósito D3 abriendo la válvula V15. Para restablecer el vacío, cerrar las válvulas V15 y V14, y abrir las válvulas V13 y V5.

3.6 Diseño estadístico

- **Análisis estadístico durante etapa de fermentación**

Se realizó un análisis estadístico de las variables de respuesta relacionadas con la caracterización fisicoquímica de los residuos fermentables del plátano, así como de las diversas relaciones entre el mosto y el agua. En este análisis, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y se llevaron a cabo comparaciones utilizando la prueba de DUNCAN ($p < 0.05$).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij}$$

- Variable independiente: Relación Mosto: Agua y Reflujo durante destilación.
- Variable dependiente: Potencial de hidrogeno, Densidad específica, Concentración de Etanol, Volumen de Fermentado Rendimiento de biomasa respecto a azúcares totales ($Y_{x/s}$), Rendimiento de bioetanol respecto a azúcares totales ($Y_{p/s}$), Productividad volumétrica de biomasa (Q_x), Productividad volumétrica de bioetanol (Q_p).
- Unidad experimental: Bidones de plástico conteniendo 7 L de mezcla mosto: agua experimental.

Tabla 3. Diseño DCA

MUESTRA	RELACION MOSTO: AGUA			Reflujo		
	20:50	30:40	40:30	1s/1s	1s/2s	1s/3s
1	x			X		
2		x			x	
3			x			x

El diseño experimental se fue estructurado según se visualiza en la tabla 3

- **Análisis estadístico durante etapa de destilación**

Se empleó un diseño estadístico de muestreo completamente al azar, con un arreglo factorial de 3x3, lo que implicó un total de 9 tratamientos y 27 experimentos. Estos resultados serán sometidos a una evaluación estadística para identificar posibles diferencias significativas entre ellos.

$$Y_{ijk} = U + F_i + R_j + (F.R)_{ij} + (FR)_{ik} + E_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} : Observación individual
 E_{ijk} : Error experimental

Variable dependiente: Concentración de Etanol, Rendimiento y Grado Alcohólico.

Variables Independientes:

R_k : Reflujo (3 niveles k= 1, 2,3)
 R1 : 1s/1s
 R2 : 1s/2s
 R3 : 1s/3s

Unidad experimental: 2Lts de mosto fermentado de pulpa de plátano “*Musa paradisiaca*”.

En esta investigación, se empleó el programa Statgraphics® para la optimización, utilizando un diseño de superficie de respuesta con una variable de respuesta y dos factores experimentales. El diseño experimental se realizó siguiendo un enfoque completamente al azar con un arreglo factorial.

La metodología propuesta en el presente trabajo puede resumirse en la figura N°4.

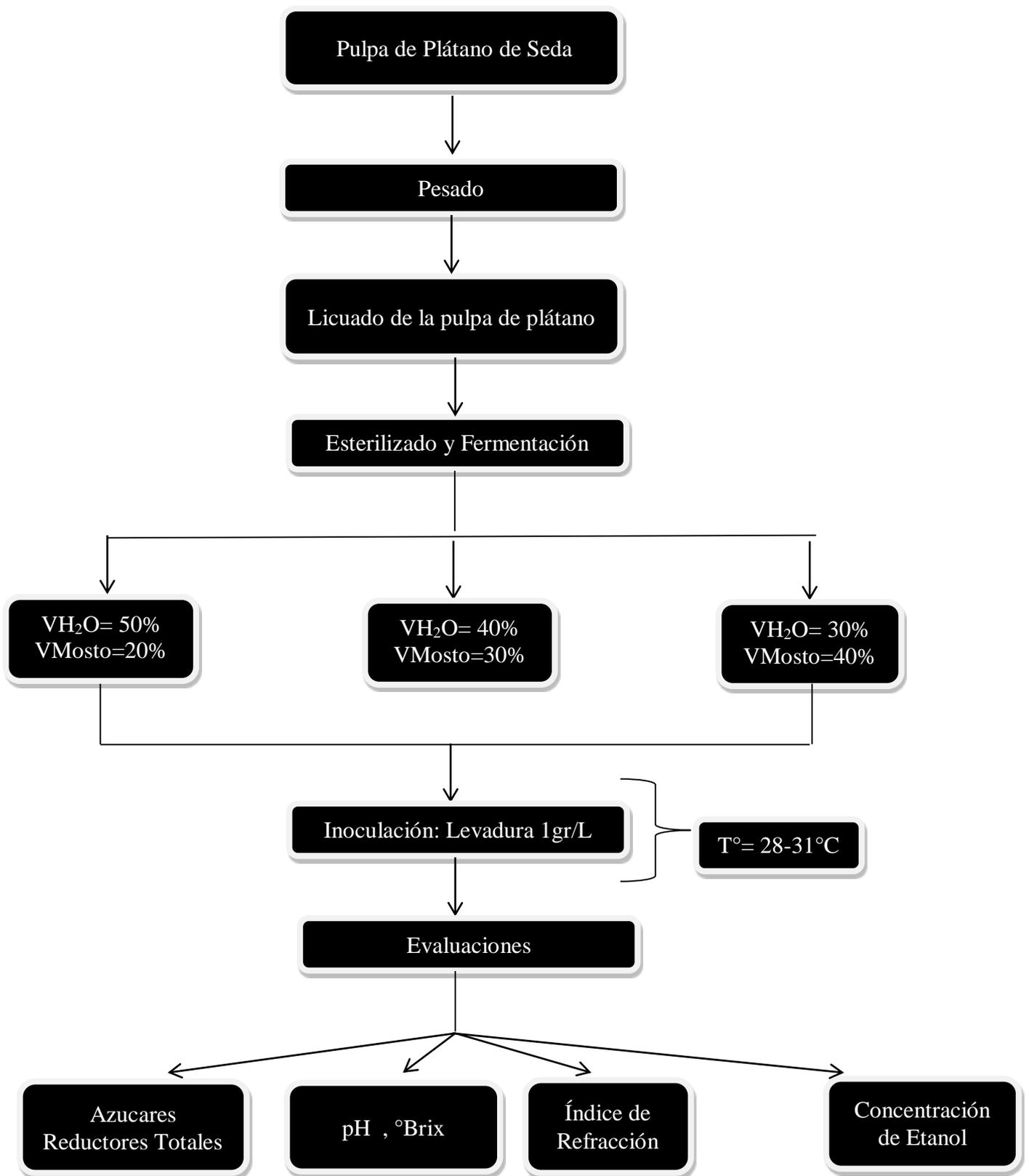


Figura 4. Diagrama de procesos de obtención de bioetanol a partir de pulpa de plátano (*M. paradisiaca*) empleando *S. cerevisiae*. Fuente propia.

IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN

4.1 Característica Físicoquímica de la Residuos Fermentables de plátano:

Los resultados de los análisis físicoquímicos de plátano (pulpa) se muestran en la tabla 4 a continuación:

Tabla 4. Caracterización físicoquímica de la pulpa de plátano (*Musa paradisiaca*)

Análisis	Resultados
Humedad (%)	0.79 ± 0.21
Cenizas (%)	3.5 ± 0.1
Índice de Acidez (%)	0.7 ± 0.2
pH	4.50 ± 0.5
Densidad	1.02 ± 0.2

El contenido de humedad de los residuos fermentables (pulpa) arrojó un valor de 0.79% para el plátano.

El valor promedio del pH obtenido en esta investigación fue de 4.50.

El valor promedio obtenido para el contenido de cenizas fue del 3.5%, lo que sugiere la presencia general de minerales, como carbonatos derivados de la materia orgánica. Aunque este parámetro no afecta directamente el proceso de obtención del bioetanol, podría influir en su calidad, ya que algunos de estos minerales, como el calcio y el magnesio, podrían provocar la formación de incrustaciones en el sistema de inyección de combustible.

El valor promedio del índice de acidez obtenido fue del 4.5% (expresado en ácido cítrico). Es importante destacar que este valor se encuentra fuera del intervalo recomendado, que es inferior al 3% en masa, para la producción de bioetanol.

El uso de la pulpa de fruta y su posterior destilado para la obtención de bioetanol empleado en el presente informe de tesis tiene como base el estudio de los autores Shah et al. (2019), quienes describen como eligieron mezclas de pulpa de fruta como sustrato debido a su alto contenido de azúcares útiles y monómeros de carbohidratos biodisponibles para la producción de bioetanol seguido de un proceso de destilado para

su purificación. A partir de este proceso, se han llevado a cabo numerosos estudios con el objetivo de obtener bioetanol a partir de pulpas de fruta.

4.2 Determinación de las Condiciones Óptimas para la Fermentación del Mosto

4.2.1 Evaluación de la Fermentación Alcohólica del Mosto de pulpa de plátano.

4.2.1.1 Cinética microbiana del proceso fermentativo

Los resultados de la cinética microbiana de la relación Mosto: Agua 20:50 (R1) se evidencia en la figura 5.

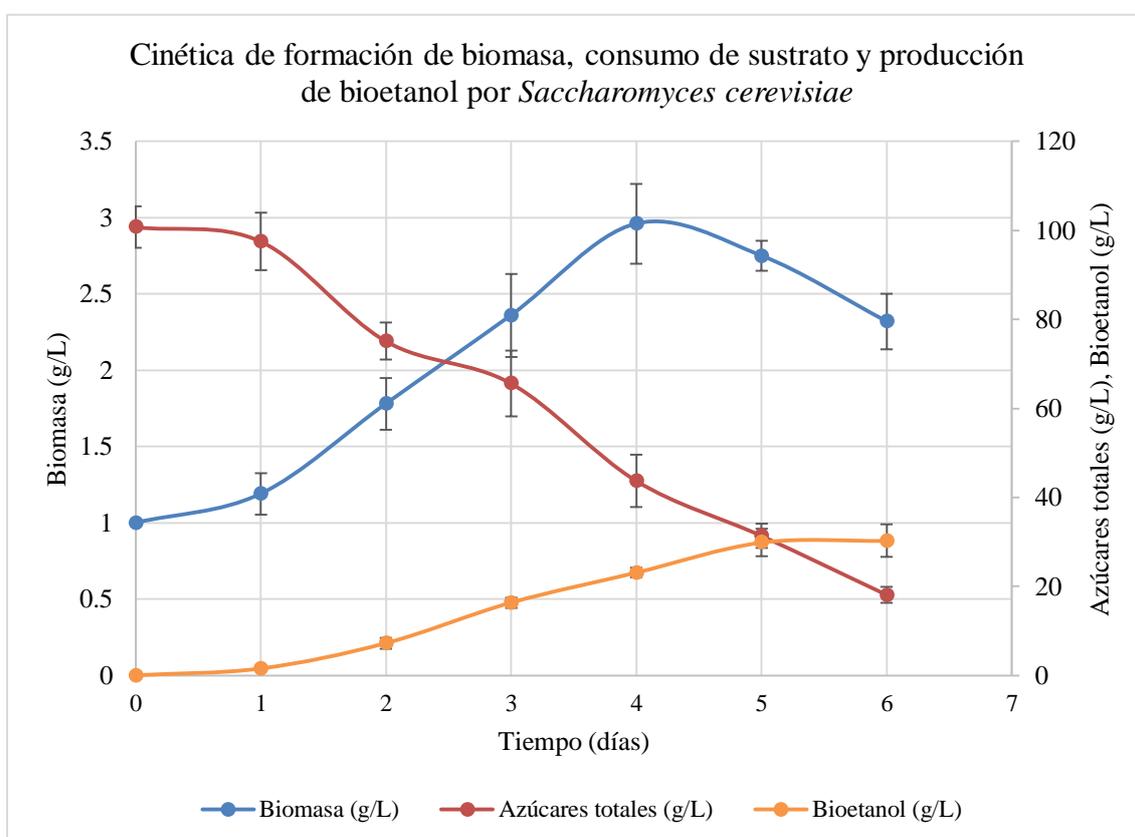


Figura 5. Cinética microbiana de *Saccharomyces cerevisiae* de la relación Mosto: Agua 20:50 (R1).

La cinética de R1 inició con una concentración de 100.76 ± 0.35 de azúcares totales ($9.7 \text{ }^\circ\text{Bx}$) inoculado con 1g/L de levadura *S. cerevisiae* durante el periodo de 06 días donde se alcanzó una concentración final de etanol de $30.32 \pm 0.02 \text{ g/L}$ ($3.84 \text{ }^\circ\text{GL}$) según se detalla en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros fermentativos de la relación Mosto: Agua 20:50 (R1).

Tiempo (días)	Biomasa (g/L)	Azúcares totales (g/L)	Bioetanol (g/L)
0	1.00 ± 0.00	100.76 ± 0.35	0.00 ± 0.00
1	1.19 ± 0.04	97.53 ± 0.11	1.53 ± 0.02
2	1.78 ± 0.02	75.11 ± 0.23	7.25 ± 0.01
3	2.36 ± 0.06	65.62 ± 0.18	16.39 ± 0.03
4	2.96 ± 0.01	43.73 ± 0.17	23.14 ± 0.05
5	2.75 ± 0.04	31.38 ± 0.27	29.91 ± 0.07
6	2.32 ± 0.05	18.13 ± 0.32	30.32 ± 0.02

La velocidad específica de crecimiento de la fermentación (μ) de R1 fue 0.3016 ± 0.0017 días⁻¹ y fue determinada como la pendiente del logaritmo natural de la biomasa durante la fase estacionaria vs tiempo según se muestra en la figura 6.

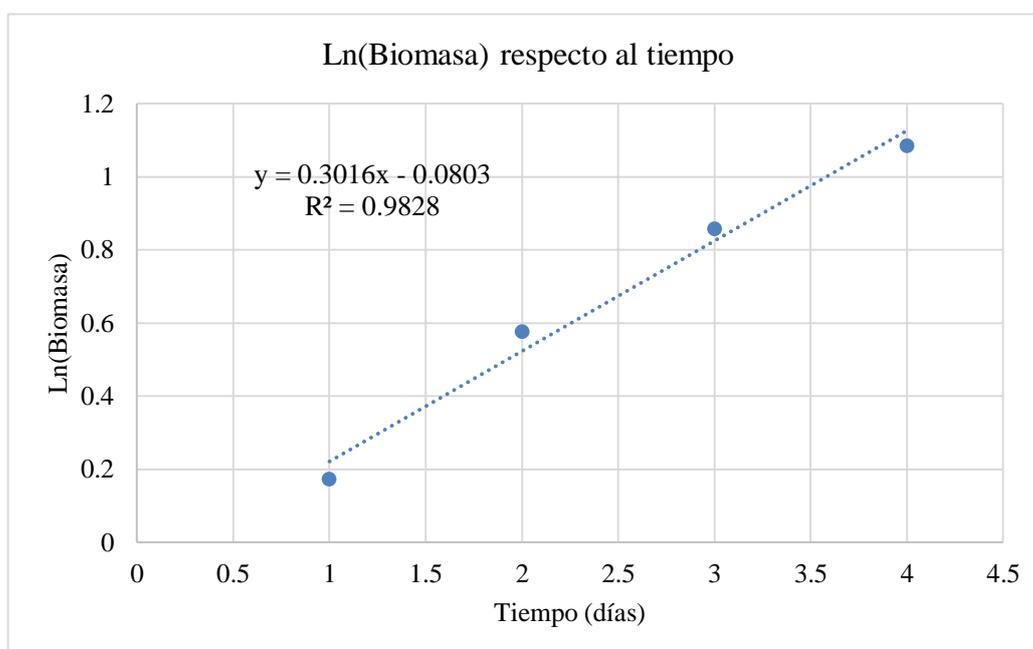


Figura 6. Determinación de velocidad específica de crecimiento de relación Mosto: Agua 20:50 (R1).

De los valores obtenidos se determinó los parámetros cinéticos de rendimiento de biomasa respecto a azúcares totales ($Y_{x/s}$), rendimiento de bioetanol respecto a azúcares totales ($Y_{p/s}$), productividad volumétrica de biomasa (Q_x) y productividad volumétrica de bioetanol (Q_p) según se detalla en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros cinéticos de relación Mosto: Agua 20:50 (R1).

Parámetro cinético	Valor
$Y_{x/s}$	0.0344 ± 0.0014
$Y_{p/s}$	0.3669 ± 0.0016
Q_x	0.4900 ± 0.0012
Q_p	0.21055 ± 0.017

Los resultados de la cinética microbiana de la relación Mosto: Agua 30:40 (R2) se evidencia en la figura 7.

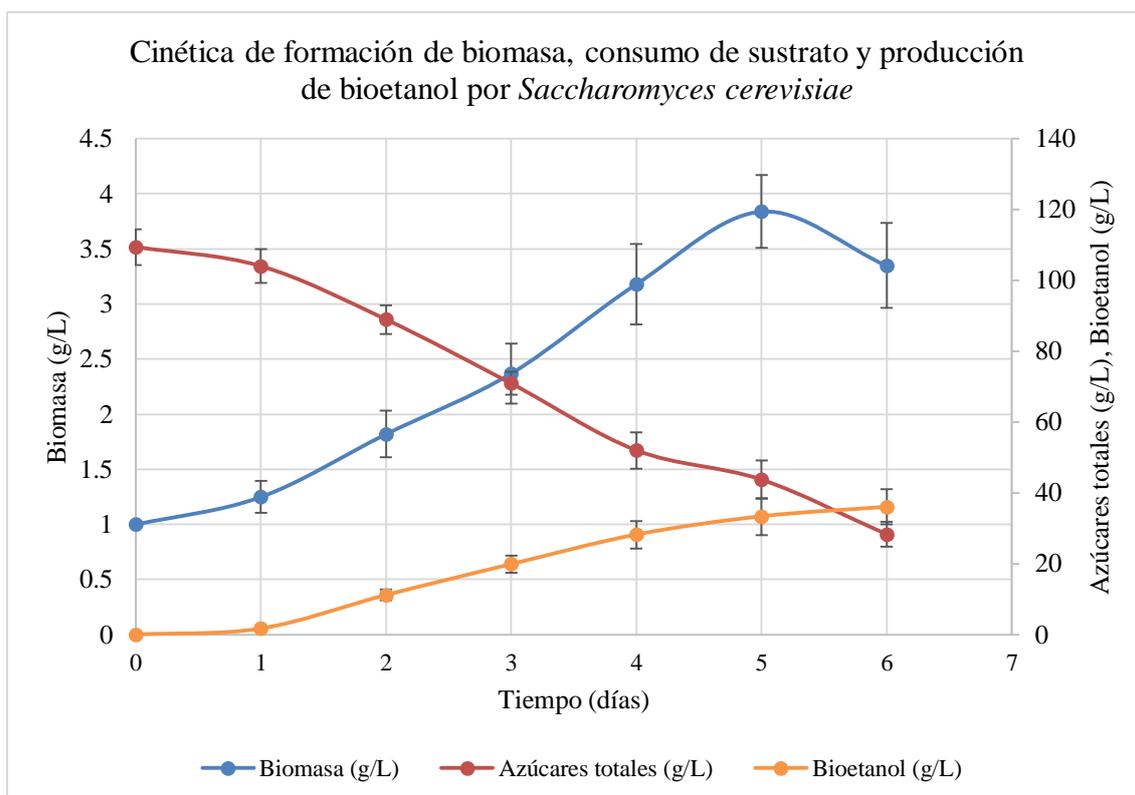


Figura 7. Cinética microbiana de *Saccharomyces cerevisiae* de la relación Mosto: Agua 30:40 (R2).

La cinética de R2 inició con una concentración de 109.42 ± 0.42 g/L de azúcares totales (10.5 °Bx) inoculado con 1g/L de levadura *S. cerevisiae* durante el periodo de 06 días donde se alcanzó una concentración final de etanol de 36.02 ± 0.07 g/L (4.57 °GL) según se detalla en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros fermentativos de la relación Mosto: Agua 30:40 (R2).

Tiempo (días)	Biomasa (g/L)	Azúcares totales (g/L)	Bioetanol (g/L)
0	1.00 ± 0.00	109.42 ± 0.42	0.00 ± 0.00
1	1.25 ± 0.01	104 ± 0.10	1.69 ± 0.04
2	1.82 ± 0.08	88.95 ± 0.21	11.13 ± 0.01
3	2.37 ± 0.02	70.89 ± 0.12	19.85 ± 0.08
4	3.18 ± 0.01	52.02 ± 0.17	28.18 ± 0.06
5	3.84 ± 0.07	43.73 ± 0.31	33.34 ± 0.02
6	3.35 ± 0.03	28.31 ± 0.24	36.02 ± 0.07

La velocidad específica de crecimiento de la fermentación (μ) de R2 fue 0.2803 ± 0.0032 días⁻¹ según se muestra en la figura 8.

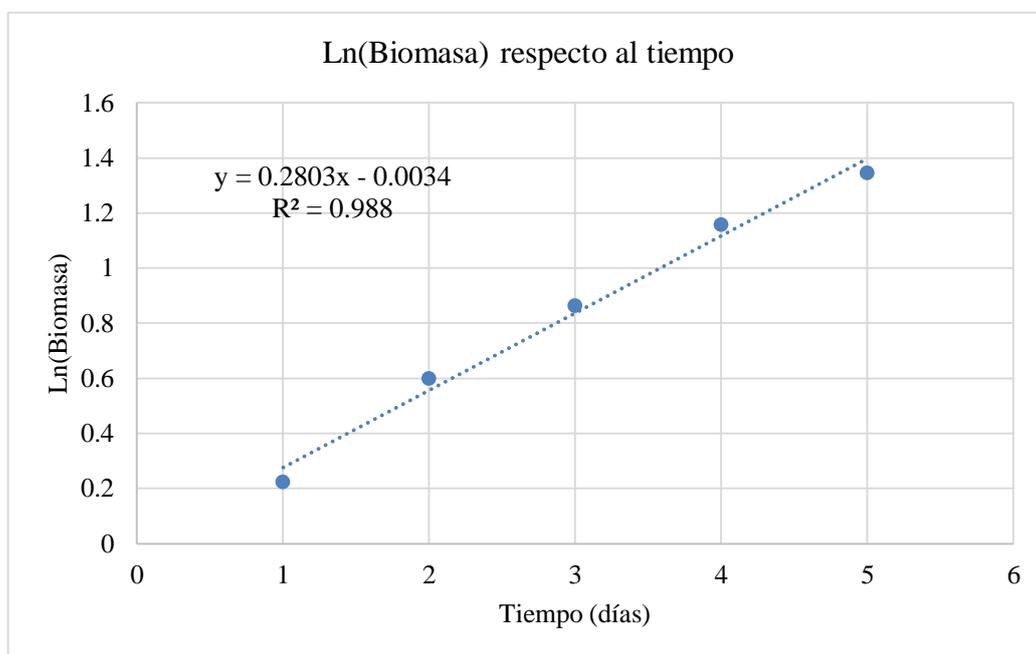


Figura 8. Determinación de velocidad específica de crecimiento de relación Mosto: Agua 30:40 (R2).

De los valores obtenidos se determinó los parámetros cinéticos de rendimiento de biomasa respecto a azúcares totales ($Y_{x/s}$), rendimiento de bioetanol respecto a azúcares totales ($Y_{p/s}$), productividad volumétrica de biomasa (Q_x) y productividad volumétrica de bioetanol (Q_p) según se detalla en la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros cinéticos de relación Mosto: Agua 30:40 (R2).

Parámetro cinético	Valor
$Y_{x/s}$	0.0432 ± 0.0012
$Y_{p/s}$	0.4441 ± 0.0011
Q_x	0.5680 ± 0.0008
Q_p	0.2501 ± 0.0012

Los resultados de la cinética microbiana de la relación Mosto: Agua 40:30 (R3) se evidencia en la figura 9.

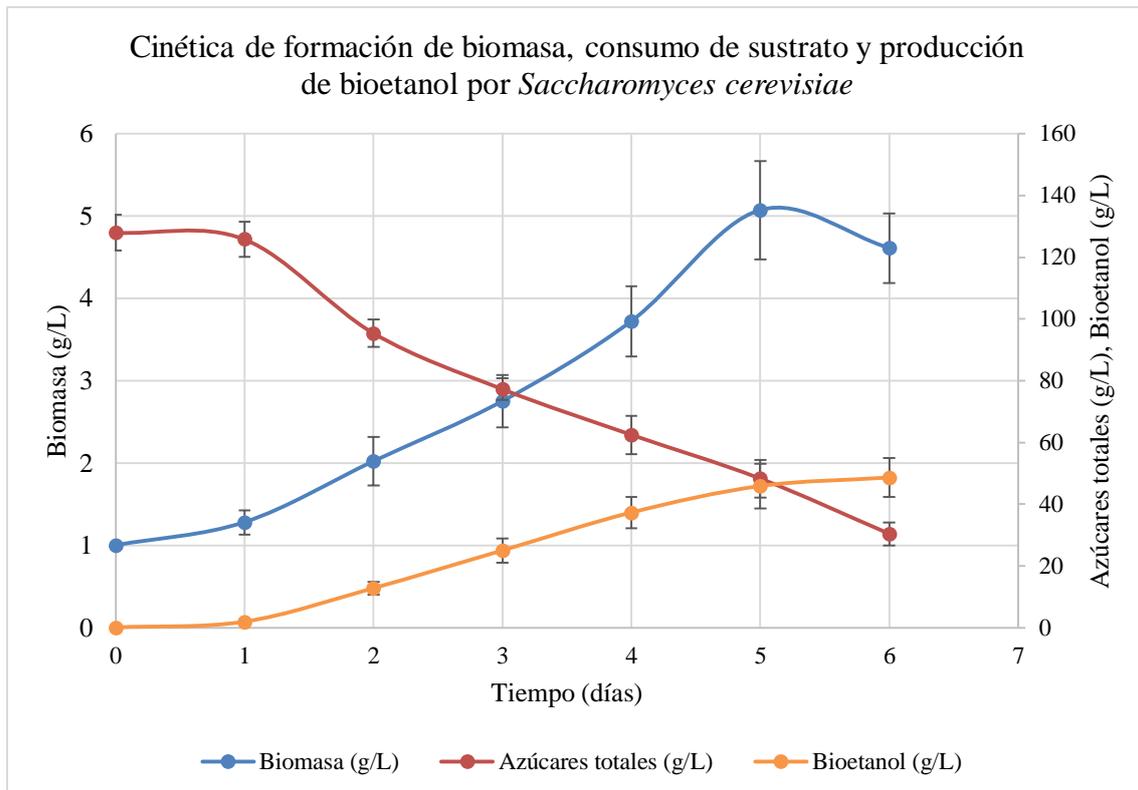


Figura 9. Cinética microbiana de *Saccharomyces cerevisiae* de la relación Mosto: Agua 40:30 (R3).

La cinética de R3 inició con una concentración de 128.01 ± 0.47 g/L de azúcares totales (12.2 °Bx) inoculado con 1g/L de levadura *S. cerevisiae* durante el periodo de 06 días donde se alcanzó una concentración final de etanol de 48.62 g/L (6.16 °GL) según se detalla en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros fermentativos de la relación Mosto: Agua 40:30 (R3).

Tiempo (días)	Biomasa (g/L)	Azúcares totales (g/L)	Bioetanol (g/L)
0	1.00 ± 0.00	128.01 ± 0.47	0.00 ± 0.00
1	1.28 ± 0.04	125.81 ± 0.41	1.86 ± 0.10
2	2.02 ± 0.02	95.38 ± 0.27	12.73 ± 0.07
3	2.75 ± 0.08	77.23 ± 0.34	24.96 ± 0.01
4	3.72 ± 0.01	62.45 ± 0.18	37.26 ± 0.02
5	5.07 ± 0.03	48.24 ± 0.27	45.85 ± 0.05
6	4.61 ± 0.07	30.35 ± 0.33	48.62 ± 0.01

La velocidad específica de crecimiento de la fermentación (μ) de R3 fue 0.3364 ± 0.0022 días⁻¹ según se muestra en la figura 10.

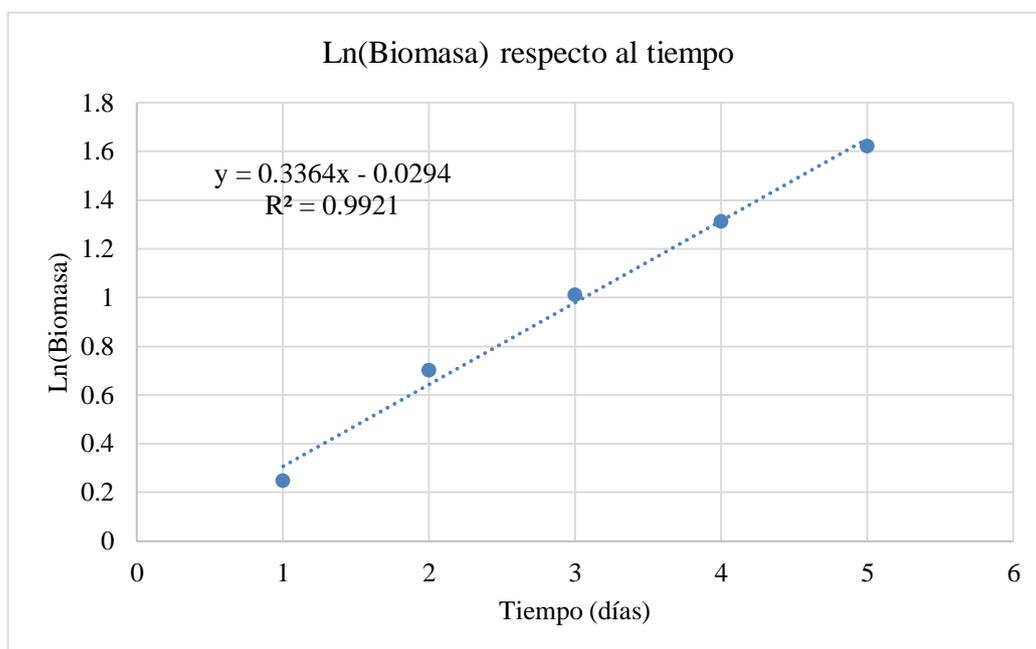


Figura 10. Determinación de velocidad específica de crecimiento de relación Mosto: Agua 40:30 (R3).

De los valores obtenidos se determinó los parámetros cinéticos de rendimiento de biomasa respecto a azúcares totales ($Y_{x/s}$), rendimiento de bioetanol respecto a azúcares totales ($Y_{p/s}$), productividad volumétrica de biomasa (Q_x) y productividad volumétrica de bioetanol (Q_p) según se detalla en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros cinéticos de relación Mosto:Agua 40:30 (R3).

Parámetro cinético	Valor
$Y_{x/s}$	0.0510 ± 0.0010
$Y_{p/s}$	0.4978 ± 0.0012
Q_x	0.8140 ± 0.0010
Q_p	0.3376 ± 0.0015

Según estequiometría, el rendimiento teórico de etanol formado por unidad de biomasa ($Y_{p/s}$) del proceso de fermentación puede determinarse de la siguiente manera:



$Y_{p/s}^*$ = Peso molecular del producto ($2C_2H_5OH$) / Peso molecular del sustrato $C_6H_{12}O_6$.
(rendimiento teórico)

$$Y_{p/s}^* = 92 \text{ g/mol} / 180 \text{ g/mol}$$

$$Y_{p/s}^* = 0.5111$$

Donde $Y_{p/s}^*$ es el es el rendimiento de producto en función del sustrato máximo teórico

Según se detalla, el rendimiento máximo de etanol a partir de la fuente de carbono ($Y_{p/s}$) es de 0.51. Por lo cual, comparando los resultados obtenidos de las fermentaciones experimentales de R1, R2 y R3 se obtiene los rendimientos ($Y_{p/s}$) de 0.3669 ± 0.0016 , 0.4441 ± 0.0011 y 0.4978 ± 0.0012 respectivamente, evidenciándose un mayor rendimiento en el tratamiento relación Mosto: Agua 40:30 (R3), según se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Cuadro comparativo de rendimientos de los tratamientos realizados.

$Y_{p/s}$	Valor
Teórico	0.5111
Mosto: Agua 20:50 (R1)	0.3669 ± 0.0016
Mosto: Agua 30:40 (R2)	0.4441 ± 0.0011
Mosto: Agua 40:30 (R3)	0.4978 ± 0.0012

Los parámetros fermentativos de cada tratamiento realizado se pueden resumir en la tabla 12.

Tabla 12. Parámetros fermentativos de Mosto: Agua 20:50 (R1), Mosto:Agua 30:40 (R2) y Mosto:Agua 40:30 (R3)

	Control	R1	R2	R3
μ	0.3094 ± 0.0027	0.3016 ± 0.0017	0.2803 ± 0.0032	0.3364 ± 0.0022
$Y_{x/s}$	0.0484 ± 0.0010	0.0344 ± 0.0014	0.0432 ± 0.0012	0.0510 ± 0.0010
$Y_{p/s}$	0.4916 ± 0.0013	0.3669 ± 0.0016	0.4441 ± 0.0011	0.4978 ± 0.0012
Q_x	0.6900 ± 0.0011	0.4900 ± 0.0012	0.5680 ± 0.0008	0.8140 ± 0.0010
Q_p	0.2795 ± 0.0014	0.2105 ± 0.0017	0.2501 ± 0.0012	0.3376 ± 0.0015

De los parámetros fermentativos obtenidos de cada tratamiento experimental, se puede evidenciar que la relación Mosto: Agua 40:30 (R3) presentó los mayores valores de μ , $Y_{x/s}$, $Y_{p/s}$, Q_x y Q_p con los valores de 0.3364 ± 0.0022 ; 0.0510 ± 0.0010 ; 0.4978 ± 0.0012 ; 0.8140 ± 0.0010 y 8.1033 ± 0.015 respectivamente. En el trabajo del autor Srilekha et al (2011), empleando un monocultivo de *S. cerevisiae* (OVB 11) empleando pajilla de arroz como sustrato se obtuvo un rendimiento de $Y_{p/s}$ de 0.3 y un Q_p de 0.20. En comparación con los resultados obtenidos en el presente trabajo, se evidencia que la fuente de carbono (pulpa de plátano en este caso) tiene un impacto significativo en los parámetros fermentativos, obteniendo un $Y_{p/s}$ y Q_p de 0.0510 ± 0.0010 y 0.3376 ± 0.0015 . El tratamiento R3 evidenció valores superiores de parámetros fermentativos en comparación con los demás tratamientos y el grupo control

4.2.1.2 Comportamiento del pH durante el proceso de Fermentación

La medición del pH se llevó a cabo en las tres relaciones diferentes de Mosto: Agua (20:50, 30:40 y 40:30) para cada porcentaje de levadura (1 g de levadura por litro de agua) durante todo el proceso de fermentación. En cada intervalo de tiempo, se homogeneizó el mosto mediante agitación y se procedió a realizar la medición correspondiente del pH.

Tabla 13. Concentración de Levadura y Relación Mosto: Agua de trabajo.

<i>Concentración de Levadura</i>		<i>Relaciones de Mosto: Agua</i>	
C1	1 g/L	R1:	20:50
		R2:	30:40
		R3:	40:30

Tabla 14. Comportamiento del pH durante el proceso de fermentación con una concentración de 1 gramo de levadura por litro, en las tres relaciones experimentales de Mosto: Agua: R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30), a lo largo de un período de fermentación de 6 días.

Toma de Muestra (día)	C1 (1 g/L)		
	R1	R2	R3
0	4.85 ± 0.11	4.71 ± 0.24	4.60 ± 0.17
1	4.80 ± 0.10	4.62 ± 0.17	4.51 ± 0.28
2	4.40 ± 0.15	4.38 ± 0.14	4.37 ± 0.21
3	4.36 ± 0.22	4.35 ± 0.21	4.14 ± 0.14
4	4.35 ± 0.27	4.28 ± 0.16	4.06 ± 0.23
5	4.15 ± 0.14	4.13 ± 0.12	4.04 ± 0.31
6	4.12 ± 0.09	4.10 ± 0.25	4.03 ± 0.29

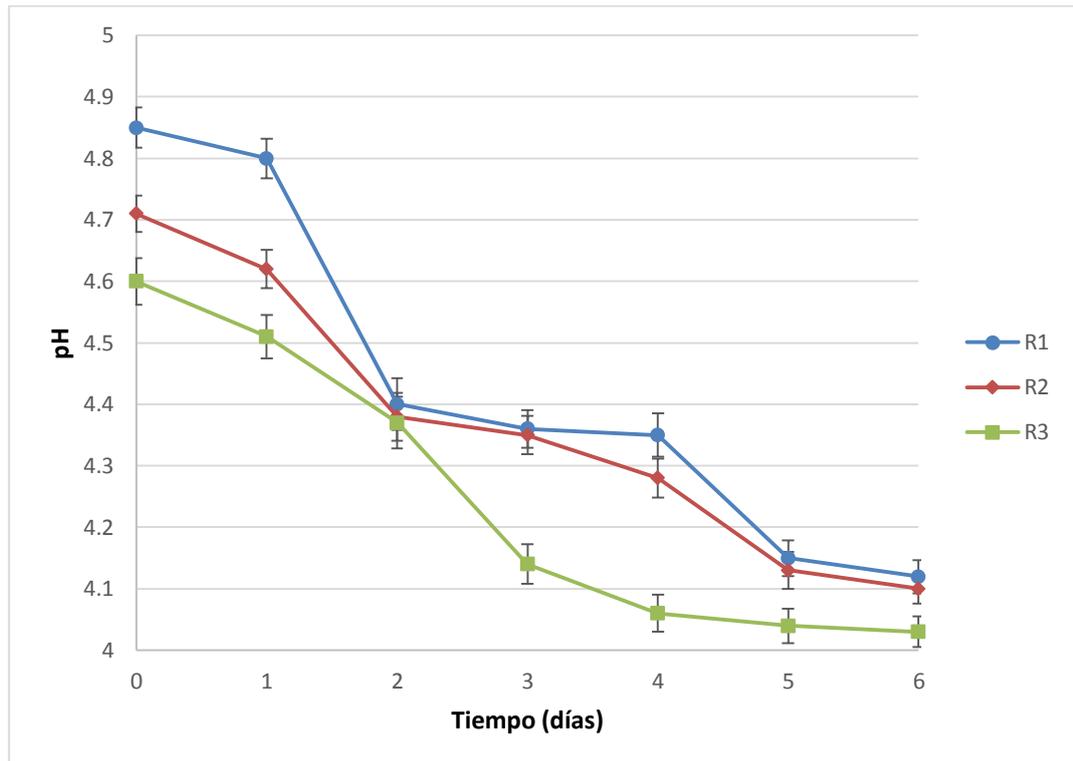


Figura 11. Comportamiento de pH durante la Fermentación de: R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30) durante 6 días de fermentación.

A medida que el pH del medio disminuye, disminuye el riesgo de infección. Sin embargo, trabajar con un pH muy bajo puede ralentizar la fermentación, ya que la levadura no se desarrolla de manera óptima en esas condiciones.

En el gráfico se aprecia la evolución del pH a lo largo del tiempo durante la fermentación del mosto, desde el inicio hasta el final del proceso. La Figura 11 muestra cómo el pH inicial de R1 (4.85 ± 0.11), R2 (4.71 ± 0.24) y R3 (4.60 ± 0.17) disminuye gradualmente durante los 6 días de fermentación, alcanzando valores de pH de R1 (4.12 ± 0.09), R2 (4.10 ± 0.25) y R3 (4.03 ± 0.29). A medida que avanza la fermentación, la disminución del pH se vuelve más lenta debido a la reducción de la concentración de azúcares, lo que resulta en una conversión mínima a etanol. Como resultado, cuando no hay cambios significativos en las concentraciones de azúcares y etanol, el pH se mantiene prácticamente constante. Entre los diferentes tratamientos, se observa que el tratamiento R3 presenta los valores más bajos de pH, mientras que el tratamiento R1 muestra los valores más altos de pH, lo que está relacionado con el contenido de azúcares. A mayor tiempo de fermentación la disminución del pH es lenta debido a que la concentración de azúcares es muy baja, por lo que su conversión a etanol es mínima, por lo tanto, al no haber cambios en la concentración de azúcares y etanol el pH se mantiene prácticamente constante. El autor Wong & Sanggari (2014) destaca que El pH es un factor importante que puede influir en la formación de etanol al alterar la hidrofobicidad superficial y la interacción electrostática en las enzimas durante el proceso fermentativo. Este autor en su trabajo de obtención de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar varió el pH del mosto en 3, 3.5, 4, 4.5 y 5. En base a los resultados obtenidos, el autor reporta que el pH 4,5 mostró el mayor contenido de etanol en agua de 14,8 %, seguido del pH 4,0 con 11,9 %, luego el pH 3,5, con 11,6 %, y el pH 3,0, con 10,7 % de alcohol w/w%. En comparación, el presente trabajo obtuvo la mayor formación de etanol con un pH de 4.85 ± 0.11 .

4.2.1.3 Comportamiento de los °Brix durante el proceso de Fermentación

La medición de los grados Brix, se realizó en las tres relaciones de Mosto: Agua (20:50, 30:40 y 40:30) para cada porcentaje de levadura (1g de levadura en 1 Litro de agua) durante todo el proceso de fermentación. Para esto, en cada intervalo de tiempo, se homogenizó el mosto mediante agitación y se efectuaba la medición respectiva de los °Brix.

Tabla 15. Comportamiento de °Bx durante el proceso de Fermentación con 1 gramo de levadura/litro, para R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30) durante 6 días de fermentación.

Toma de Muestra (día)	C1 (1 g/L)		
	R1	R2	R3
0	9.7 ± 0.3	10.5 ± 0.4	12.2 ± 0.2
1	9.4 ± 0.2	10 ± 0.1	12 ± 0.2
2	7.3 ± 0.1	8.6 ± 0.3	9.2 ± 0.1
3	6.4 ± 0.3	6.9 ± 0.2	7.5 ± 0.3
4	4.3 ± 0.2	5.1 ± 0.1	6.1 ± 0.2
5	3.1 ± 0.1	4.3 ± 0.3	4.7 ± 0.1
6	1.8 ± 0.1	2.8 ± 0.2	3.0 ± 0.3

En comparación de los resultados obtenidos, el autor Rico (2021) destaca las técnicas aplicadas en otros sustratos alternativos para la obtención de bioetanol, como el fruto de la caña fístula "*Cassia fistula*". Este autor describe como el fruto de esta planta fue recolectado y concentrado mediante hervor a las concentraciones de 25, 20 y 15 °Bx. 1L del mosto resultante posterior a su enfriado fue inoculado con 1g/L de levadura comercial y dejado fermentar durante 1 semana a temperatura ambiente. A diferencia del presente informe de tesis, el autor empleó un pretratamiento de concentrado para alcanzar mayores valores de densidad inicial. La inclusión de pasos adicionales suele evitarse debido a que los gastos generados en pretratamientos pueden incrementar el precio del proceso productivo, No obstante, a pesar de describir un consumo de sustrato menor al del presente informe de tesis (1.8 ± 0.1 °Bx al final de la fermentación de 06 días del presente trabajo en comparación a 3.0°Bx al final de la fermentación de 07 días del autor).

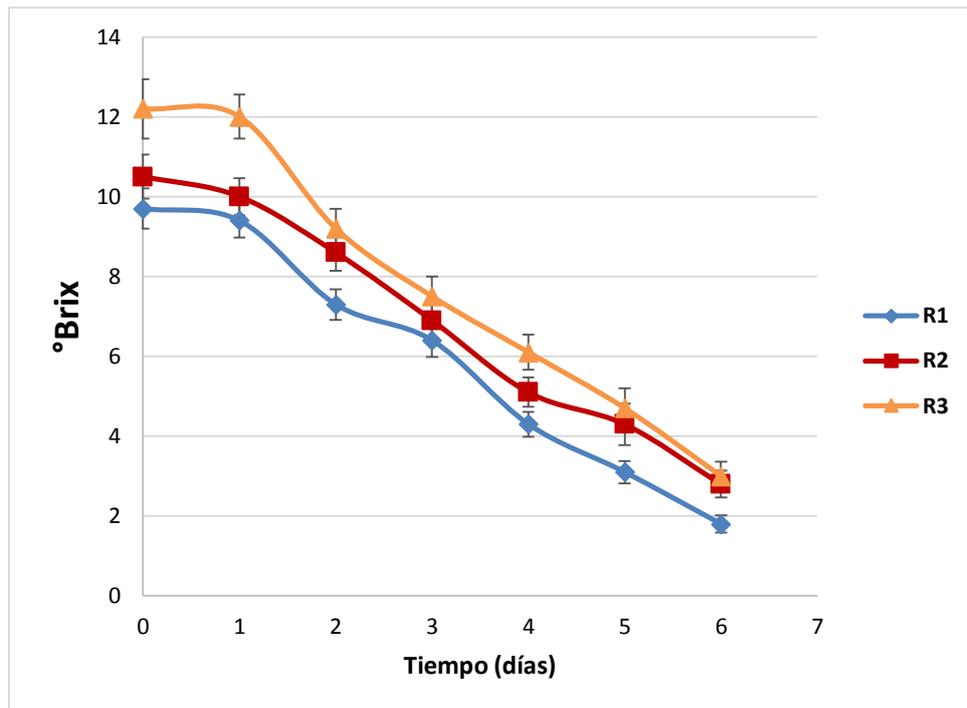


Figura 12. Comportamiento de °Bx durante la Fermentación de: R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30) durante 6 días de fermentación.

El Comportamiento de °Bx durante la Fermentación fue bajando con el día a día, dando como resultado que el R1 fue el que menos °Bx tuvo al final de la fermentación con 1.8 ± 0.1 y el R3 fue el que mayor °Bx tuvo con 3.0 ± 0.3 Este comportamiento se detalla en la Figura 12.

4.2.1.4 Análisis del Efecto del pH durante el proceso de Fermentación de la pulpa de plátano.

Tabla 16. ANOVA para pH por Dilución

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0868111	2	0.0434056	0.76	0.4828
Intra grupos	0.851567	15	0.0567711		
Total (Corr.)	0.938378	17			

En la Tabla 14, se descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, en este caso, es igual a 0.764571, y se calcula como el

cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Dado que el valor-P de la razón-F es mayor o igual a 0.05, no se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las tres variables con un nivel de confianza del 95.0%.

Tabla 17. Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
R3	6	4.20667	X
R2	6	4.325	X
R1	6	4.37167	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
R1 - R2		0.0466667	0.29321
R1 - R3		0.165	0.29321
R2 - R3		0.118333	0.29321

* indica una diferencia significativa.

En la Tabla 15, se ha aplicado un procedimiento de comparación múltiple para determinar si algunas medias son significativamente diferentes de otras. La parte inferior de la tabla muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Los resultados indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ninguna de las combinaciones de medias, con un nivel de confianza del 95.0%. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo según la alineación de las X's en la columna correspondiente. Esto significa que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los niveles que comparten la misma columna de X's. El método actualmente utilizado para discernir entre las medias es el procedimiento de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher. Con este método, existe un riesgo del 5.0% de concluir que dos medias son significativamente diferentes cuando en realidad su diferencia es igual a 0.

4.2.1.5 Análisis del Efecto de la Relación Mosto: Agua en el °Bx durante el proceso de Fermentación de la pulpa de plátano.

Tabla 18. ANOVA para °Bx por Dilución

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	10.27	2	5.135	0.62	0.5492
Intra grupos	123.47	15	8.23133		
Total (Corr.)	133.74	17			

En la Tabla 16, se descompone la varianza de los datos en dos componentes: uno entre grupos y otro dentro de grupos. La razón-F, en este caso, es igual a 0.623836 y se calcula como el cociente entre la estimación entre grupos y la estimación dentro de grupos. Dado que el valor-P de la razón-F es mayor o igual a 0.05, no se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las tres variables con un nivel de confianza del 95.0%.

Tabla 19. Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje LSD			
	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
R1	6	5.38333	X
R2	6	6.28333	X
R3	6	7.23333	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
R1 - R2		-0.9	3.53062
R1 - R3		-1.85	3.53062
R2 - R3		-0.95	3.53062

* indica una diferencia significativa.

En la Tabla 17, se ha aplicado un procedimiento de comparación múltiple para determinar si algunas medias son significativamente diferentes de otras. La parte inferior de la tabla muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Los resultados indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ninguna de las combinaciones de medias, con un nivel de confianza del 95.0%. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo según la alineación de las X's en la columna correspondiente. Esto significa que no hay diferencias

estadísticamente significativas entre los niveles que comparten la misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

4.2.1.6 Determinación de rendimiento de los Mostos: R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30) posterior a 6 días de fermentación.

Tabla 20. Rendimiento de Bioetanol a partir de pulpa de plátano para: R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30) posterior 6 días de fermentación.

Rendimiento (L) por Mosto		
C1 (1 g/L)		
R1(L)	R2 (L)	R3 (L)
3.2 ± 0.1	2.8 ± 0.2	2.7 ± 0.1

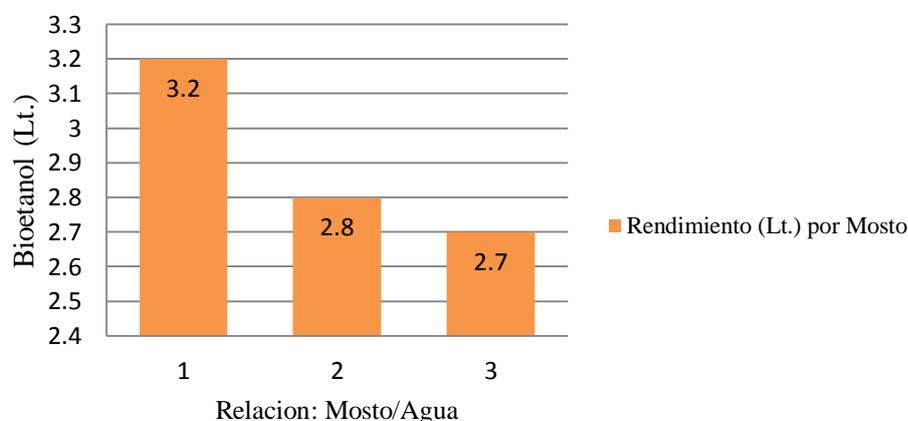


Figura 13. Rendimiento de Bioetanol a partir de la pulpa de plátano expresado volumen de bioetanol para: R1 (Mosto: Agua 20:50), R2 (Mosto: Agua 30:40) y R3 (Mosto: Agua 40:30) posterior a 6 días de fermentación.

El rendimiento de bioetanol (Figura 13) fue más en el R1 debido que tuvo más cantidad de agua y menos pulpa en el biodigestor, el rendimiento de bioetanol en R3 fue menor debido que tuvo más pulpa que agua.

En el trabajo de investigación de los autores Kumar & Sureshkumar (2021) se caracterizó la formación de bioetanol a partir de Chicozapote “*Manilkara zapota*” empleando un inóculo previamente activado de *S. cerevisiae* en un volumen total de trabajo de 1L. El autor incubó la unidad experimental a 37°C durante 96 horas a una concentración inicial de azúcar de 1080 densidad específica (SG). Los autores describieron como el consumo del sustrato tuvo lugar hasta las 60 horas de fermentación volviéndose constante a la densidad de 0.978 SG llegando a obtener un porcentaje de etanol de 10.45 %v/v. En la caracterización de los parámetros fermentativos realizado en el presente informe de tesis se describió un consumo constante del sustrato inicial de 12.2 ± 0.2 °Bx (1049 por su equivalencia en SG) durante 144 horas, alcanzando una concentración final de 3.0 ± 0.3 °Bx (1.011 por su equivalencia en SG) y una formación de etanol de 48.62 ± 0.01 (6.16 °GL). Evidenciando un proceso fermentativo mucho más lento en comparación con el del autor, el uso de un cultivo starter debidamente propagado es causa probable de esta mayor performance fermentativa.

Adicionalmente, en el trabajo de Azad & Yesmin (2019) se comparó la obtención de bioetanol a partir de naranja, plátano papaya y zapote empleando un cultivo iniciador de *S. cerevisiae*, llegando a obtener las concentraciones de etanol de 35, 40, 25 y 17%v/v. Al encontrar que el plátano generó la mayor concentración de etanol, el autor profundizó en su investigación al comparar la formación de bioetanol de las 4 variedades distintas de plátano más comunes en Bangladesh: sagor, sabri, champa y bitchikola, obteniendo las concentraciones de etanol de 40, 30, 35 y 20 %v/v, con un volumen de destilado de 97, 87, 83 y 81mL respectivamente. En el presente informe de tesis empleó la variedad más común del plátano de seda en el Perú, la variedad Cavendish Valery. Comparando las concentraciones obtenidas, se puede evidenciar como además del tipo de fruta empleada, la variedad de la misma puede tener un impacto significativo en los porcentajes de bioetanol generados posterior al proceso de destilado.

4.3 Determinación de las Condiciones Óptimas de Destilación del Fermentado de pulpa de plátano.

Con el objetivo de optimizar el proceso en términos de concentración de etanol, se exploraron diferentes relaciones entre el mosto y el agua, y la razón de reflujo: 1 seg. Cerrado/ 1 seg. Abierto (razón de reflujo 1); 1 seg. Cerrado/ 2 seg. Abierto (razón de reflujo 2); y 1 seg. Cerrado/ 3 seg. Abierto (razón de reflujo 3), con el propósito de obtener mayores concentraciones de alcohol. Los resultados de los rendimientos obtenidos se resumen en la Figura 14.

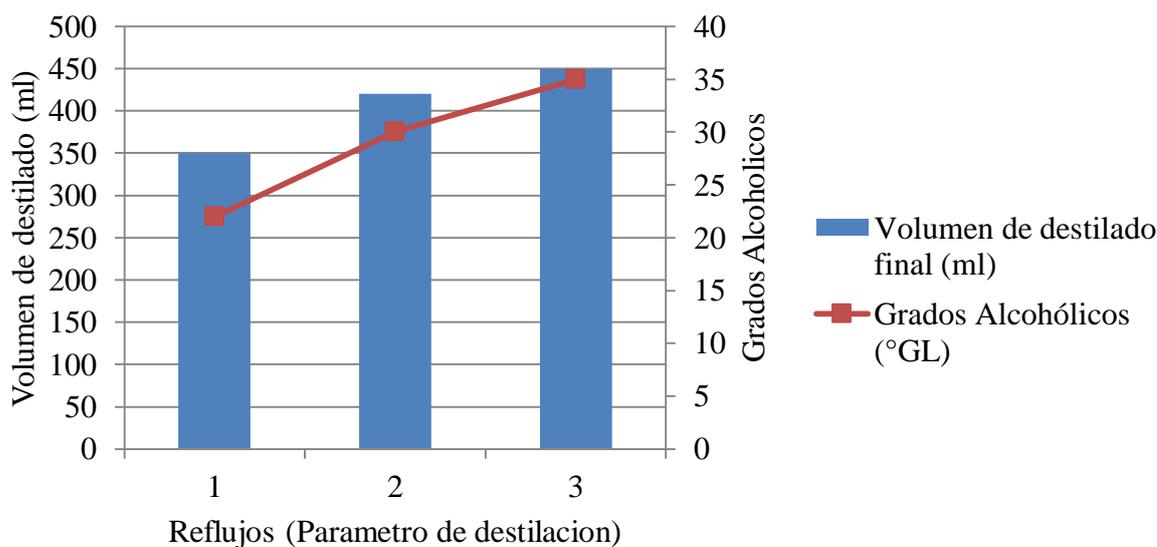


Figura 14. Volumen de destilado y grados Alcohólicos obtenidos de las muestras experimentales de reflujo de destilación de R1, R2 y R3 empleando las razones de reflujo 1, 2 y 3

Los resultados del proceso de destilación de la Relación agua mosto 20:50 (R1), 30:40 (R2), 40:30 (R3) se evidencian en las tablas 19, 20 y 21 respectivamente.

Tabla 21. Resultados del proceso de destilación de la relación mosto: agua 20:50 (R1).

Resultados Finales de Destilación	Presión Atmosférica		
	Potencia de la resistencia = 800 Watts		
	Caudal de alimentación = 3 L/h		
	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 1 seg. Abierto)	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 2 seg. Abierto)	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 3 seg. Abierto)
Volumen de destilado final (ml)	350 ± 0.5	380 ± 0.3	410 ± 0.4
Grados Alcohólicos (°GL)	22 ± 1.0	19 ± 0.8	16 ± 0.5
Índice de Refracción (IR)	1.3415	1.3410	1.3405
Densidad (Kg/m ³) (T° = 22°C)	967.9242	967.9225	967.9113

Tabla 22. Resultados del proceso de destilación de la relación mosto: agua 30:40 (R2).

Resultados Finales de Destilación	Presión Atmosférica		
	Potencia de la resistencia = 800 Watts		
	Caudal de alimentación = 3 L/h		
	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 1 seg. Abierto)	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 2 seg. Abierto)	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 3 seg. Abierto)
Volumen de destilado final (ml)	400 ± 0.4	420 ± 0.2	430 ± 0.6
Grados Alcohólicos (°GL)	31 ± 0.5	30 ± 0.5	28 ± 0.5
Índice de Refracción (IR)	1.3455	1.3440	1.3425
Densidad (Kg/m ³) (T° = 22°C)	957.9460	957.9456	957.9451

Tabla 23. Resultados del proceso de destilación de la relación mosto:agua 40:30 (R3).

Resultados Finales de Destilación	Presión Atmosférica		
	Potencia de la resistencia = 800 Watts		
	Caudal de alimentación = 3 L/h		
	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 1 seg. Abierto)	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 2 seg. Abierto)	Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 3 seg. Abierto)
Volumen de destilado final (ml)	390 ± 0.8	420 ± 0.3	450 ± 0.4
Grados Alcohólicos (°GL)	36 ± 0.9	36 ± 0.2	35 ± 0.4
Índice de Refracción (IR)	1.3493	1.3486	1.3479
Densidad (Kg/m ³) (T° = 22°C)	950.9405	950.9399	950.9392

De los valores obtenidos, la relación R3 (40:30) empleando una relación de reflujo 1 seg. Cerrado/ 3 seg. Abierto se evidenció la mayor cantidad de volumen de destilado (450 ± 0.4 mL) con un alto grado alcohólico (35 ± 0.4 °GL) en comparación con los demás tratamientos. Se estableció un grupo control de los tres tratamientos sin reflujo según se muestra a continuación.

Tabla 24. Controles de proceso de destilación sin el uso de reflujo.

Resultados Finales de Destilación	Presión Atmosférica		
	Potencia de la resistencia = 800 Watts		
	Caudal de alimentación = 3 L/h		
	Relación mosto:agua 20:50 (R1). Sin Reflujo	Relación mosto:agua 30:40 (R2). Sin Reflujo	Relación mosto:agua 40:30 (R3). Sin Reflujo
Volumen de destilado final (ml)	300 ± 0.3	350 ± 0.5	370 ± 0.1
Grados Alcohólicos (°GL)	14 ± 0.2	20 ± 0.4	30 ± 0.2
Índice de Refracción (IR)	1.3425	1.3410	1.3405
Densidad (Kg/m ³) (T° = 22°C)	957.9459	957.9454	957.9450

En comparación con el grupo control de la tabla 22, la aplicación de reflujo en el proceso de destilación evidencia un incremento en el volumen del destilado y mayores grados alcohólicos de las muestras.

En el trabajo de Cutzu & Bardi (2017) utilizando residuos de pulpa de manzanas, kiwis y melocotones con un cultivo comercial de *Saccharomyces bayanus* los autores llegaron a obtener concentraciones de bioetanol de $8.71 \pm 0.83\%$ (v/v), $7.97 \pm 0.39\%$ (v/v), y $4.26 \pm 0.27\%$ (v/v) respectivamente. El proceso de destilación efectuado por los autores para el downsteam se realizó a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vacío hasta 200 mbar de presión obteniendo un 47.53% de rendimiento (19,16 L destilado a partir de 40,31 L de fermentado). En contraste, en el presente informe de tesis utilizando pulpa de plátano se logró una concentración de bioetanol máxima de $35 \pm 0.4\%$ v/v empleando la Relación de Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 3 seg. Abierto) y la relación mosto: agua de 2L Mosto/5L Agua. Esta gran diferencia en el porcentaje de bioetanol formado puede tener como base el tipo de fruta empleada. No obstante. La diferencia en la concentración de bioetanol palidece en comparación con el rendimiento de la destilación. El presente informe de tesis solo logró un máximo de $450 \pm 0.4\text{ mL}$ a partir de 3.2L de fermentado, lo cual se traduce en un rendimiento del 14.06%, muy lejos de los 47.53% obtenidos en el trabajo de Cutzu & Bardi (2017). Se puede evidenciar que la presión de trabajo empleada durante el proceso de destilación posee un gran impacto en el rendimiento obtenido. Debido a las limitaciones del instrumental empleado en el presente informe, la presión de trabajo fue solo de una atmósfera, en contraste, el autor, con un instrumental más especializado logró trabajar hasta 200mbar de presión bajo vacío. Esta proposición es reforzada por los autores Chen et al (2018) donde destaca como la eficiencia de la destilación puede mejorarse al incrementar/disminuir la presión de la columna según la peculiaridad de cada líquido a destilar. Sumado a ello, el trabajo de Azad & Yesmin (2019) obtuvo un rendimiento máximo de bioetanol del 19.67% (teniendo un volumen posterior al fermentado de 493mL) superando por poco al rendimiento obtenido en el presente informe 14.06%, en ambos trabajos el proceso de destilación se realizó a una atmósfera.

Kumar & Sureshkumar (2021) compara la viabilidad del uso del bioetanol generado durante el proceso fermentativo con el bioetanol empleado como combustible comercial en base a sus propiedades físico-químicas, siendo la densidad uno de los criterios más

importantes para ser considerado un biocombustible. Según el estándar estadounidense ASTM citado por el autor, la densidad del biocombustible debe ser 978 kg/m^3 , donde el autor reportó una densidad de 789 kg/m^3 en su trabajo. Por el contrario, la densidad del destilado generado en el presente informe de tesis logró alcanzar un máximo de 967.9242 kg/m^3 con la Razón de reflujo = (1 seg. Cerrado/ 1 seg. Abierto), un valor mucho más cercano al de la norma citada.

El autor Rico (2021) empleó un destilador de reflujo para el destilado del fermento de caña fístula "*Cassia fistula*" obteniendo una concentración de bioetanol del 95-97%, densidad final de 3°Bx y un volumen de destilado de 418mL. la concentración del bioetanol obtenido por el autor sobrepasa los 35% de bioetanol obtenido en el presente informe. Sumado a ello, la eficiencia obtenida de 41.8% en el trabajo del autor supera los 14.06% obtenidos en el presente informe de tesis. La data presentada sugiere que el uso de un destilador de reflujo sumado a una concentración mayor de densidad inicial permitió al autor alcanzar un mayor rendimiento y concentración en comparación con el presente informe.

La actual demanda energética en conjunto con los drásticos cambios climáticos que se vienen experimentando en los últimos años ha motivado a la comunidad científica a buscar fuentes alternativas para la producción de biocombustibles. La producción de bioetanol a partir de fuentes renovables tiene una gran importancia económica y ecológica. El uso de residuos de frutas y verduras como sustratos renovables para la producción de bioetanol es una de las áreas de estudios más relevantes. Los residuos de frutas y hortalizas están fácilmente disponibles en grandes cantidades y sin coste alguno, lo que reduce los costes de producción de este biocombustible. Según se ha descrito en el presente informe de tesis, muchos estudios han reportado la utilización exitosa de residuos de frutas y verduras para la producción de bioetanol, cada proceso es único en sus rendimientos, insumos y técnicas. El procesamiento de estos residuos para la producción de bioetanol facilita el reciclaje de los mismos. Sin embargo, el reto es optimizar el alto rendimiento del bioetanol y construir el proceso a una escala que pueda satisfacer las demandas del mercado mundial (Bhuvanewari & Sivakumar, 2019).

V. CONCLUSIONES

- La caracterización fisicoquímica de la pulpa de plátano evidenció un contenido de $12^\circ \pm 0.2$ Brix, un nivel de humedad del 79%, un pH de 4.50 ± 0.5 , una densidad de 1.02 ± 0.2 kg/cm³ y un índice de acidez del $0.7 \pm 0.2\%$.
- Los resultados fermentativos obtenidos en este estudio demuestran que una concentración de levadura del 1 g/L y una relación mosto: agua de 20:50 producen un mayor volumen de fermentado, alcanzando 3.2 litros de bioetanol centrifugado con un pH de 4.12 ± 0.09 .
- Se observó que el pH disminuyó gradualmente debido al aumento de los ácidos generados durante el proceso de fermentación.
- Se determinó los parámetros cinéticos de $Y_{x/s}$, $Y_{p/s}$, Q_x y Q_p de la fermentación de mosto de pulpa de plátano (*M. paradisiaca*) obteniendo los valores para la relación Mosto:Agua 20:50 (R1) de 0.0344 ± 0.0014 , 0.3669 ± 0.0016 , 0.4900 ± 0.0012 , 5.0533 ± 0.017 ; para la relación Mosto:Agua 30:40 (R2) de 0.0432 ± 0.0012 , 0.4441 ± 0.0011 , 0.5680 ± 0.0008 , 6.0033 ± 0.012 ; y para la relación Mosto:Agua 40:30 (R3) se obtuvieron los valores de 0.0521 ± 0.0010 , 0.4978 ± 0.0012 , 0.8140 ± 0.0010 y 8.1033 ± 0.015 respectivamente.
- Se evidenció que la fermentación del tratamiento Mosto: Agua 40:30 (R3) obtuvo el mayor rendimiento de 0.4978 ± 0.0012 en comparación con los otros tratamientos
- Los parámetros óptimos determinados en este estudio para la producción de bioetanol mediante destilación continua en una UDCA/EV son los siguientes: un flujo de 3L/h y un reflujo de destilado de 0.3 (con una relación de 1 segundo cerrado por 1 segundo abierto), lo que resultó en la obtención de 350 ± 0.5 mL de destilado con un menor contenido de alcohol de 22 ± 1.0 °G.L, un mayor volumen de destilado se obtuvo con un reflujo de (1 segundo cerrado / 3 segundo abierto) con 450 ± 0.4 ml con un alto contenido de alcohol de 35 ± 0.4 °GL.
- El análisis ANOVA determina que si hay diferencia significativa entre Relaciones de Mosto: Agua durante la fermentación, así como también hay una alta diferencia significativa entre los reflujos evaluados en destilación viéndose esta en los volúmenes finales de destilación de la Relación mosto: agua de 20:50 (R1) de 350 ± 0.5 , 380 ± 0.3 y 410 ± 0.4 ml y grados alcohólicos 22 ± 1 , $19 \pm$

0.8 y $16 \pm 0.5^{\circ}\text{GL}$; Relación mosto: agua 30:40 (**R2**) de 400 ± 0.4 , 420 ± 0.2 y 430 ± 0.6 ml y grados alcohólicos 31 ± 0.5 , 30 ± 0.5 y $28 \pm 0.5^{\circ}\text{GL}$; y Relación mosto: agua de 40:30 (**R3**) de 390 ± 0.8 , 420 ± 0.3 y 450 ± 0.4 ml y grados alcohólicos 36 ± 0.9 , 36 ± 0.2 y $35 \pm 0.4^{\circ}\text{GL}$ empleando una razón de reflujo de 1 seg. Cerrado/ 1 seg. Abierto, 1 seg. Cerrado/ 2 seg. Abierto, y 1 seg. Cerrado/ 3 seg. Abierto, respectivamente.

VI. RECOMENDACIONES

- Para obtener datos certificados se deben usar equipos calibrados y cumplir las exigencias y cuidados de higiene a la hora de realizar el proceso.
- Implementación del laboratorio de investigación ya que, debido a la falta de equipos, dificulta la ejecución del proyecto.
- En la fermentación el estudio de otras levaduras, podría arrojar mejores resultados en el proceso, ya sea en la cantidad de etanol obtenido, o en la velocidad de la fermentación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera Gonzales, A. (2008). Observador continuo - discreto para la estimacion de concentraciones en una columna de destilacion, para la mezcla Etanol-Agua. Morelos.
- Agwa, O. K., Nwosu, I. G., & Abu, G. O. (2017). Bioethanol Production from *Chlorella vulgaris*; Biomass Cultivated with Plantain (*Musa paradisiaca*) Peels Extract. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 08(12), 478–490. <https://doi.org/10.4236/abb.2017.812035>
- Alonso-Gómez, L. A., Heredia-Olea, E., Serna-Saldivar, S. O., & Bello-Pérez, L. A. (2019). Whole unripe plantain (*Musa paradisiaca* L.) as raw material for bioethanol production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(13), 5784–5791. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9847>
- Alonso-Gómez, L. A., Solarte-Toro, J. C., Bello-Pérez, L. A., & Cardona-Alzate, C. A. (2020). Performance evaluation and economic analysis of the bioethanol and flour production using rejected unripe plantain fruits (*Musa paradisiaca* L.) as raw material. *Food and Bioproducts Processing*, 121, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.005>
- Álvarez Maciel, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional.
- Azad, M. A. K., & Yesmin, N. (2019). Bioethanol production from agricultural products and fruits of Bangladesh. *International Journal of GEOMATE*, 17(61), 222–227. <https://doi.org/10.21660/2019.61.4795>
- Bhuvanewari, M., & Sivakumar, N. (2019). Bioethanol Production from Fruit and Vegetable Wastes. *Bioprocessing for Biomolecules Production*, 1–536. <https://doi.org/10.1002/9781119434436>
- Bilyartinus, G., & Siswanto, A. P. (2021). The Effect of *Bacillus subtilis* on Bioethanol Production from Ambon Banana (*Musa paradisiaca* var. *sapientum* Linn) Peels by Using Fermentation Process. *Journal of Vocational Studies on Applied Research*, 3(2), 26–30.
- Brexó, R. P., & Sant'Ana, A. S. (2017). Impact and significance of microbial contamination during fermentation for bioethanol production. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 73, pp. 423–434). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.151>

- Calvo, E. (2006). Biocombustibles de plantas para producción de biodiesel. *Revista de la sociedad química del Perú*.
- Calegari, R. P., Silva, E. A. da ., Silva, A. P. M. da ., Gomes, M. P., Mota, L. A., Arthur, V., & Baptista, A. S.. (2023). Wort disinfection treatment with electron beam for bioethanol production. *Scientia Agricola*, 80, e20210260. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0260>
- Cerro Ruiz, S. (2005). Evaluación de parámetros influyentes en la caracterización de un pisco verde uva italiana (*Vitis vinifera* L) de Mangollo, Tacna. *Coin*, 71-74.
- Chaudhry, R., & Varacallo, M. (2022). Glycolysis. In *Biochemistry*. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482303/>
- Chen, H., Cai, D., Chen, C., Wang, J., Qin, P., & Tan, T. (2018). Novel distillation process for effective and stable separation of high-concentration acetone-butanol-ethanol mixture from fermentation-pervaporation integration process. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1284-8>
- Coronel, M. (2005). *Los Vinos de Frutas*. Quito.
- Cutzu, R., & Bardi, L. (2017). Production of bioethanol from agricultural wastes using residual thermal energy of a cogeneration plant in the distillation phase. *Fermentation*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/fermentation3020024>
- Douradinho, R., Sica, P., Tonoli, F., Mattos, E., Oliveira, M., Pinto, A., Mota, L., Faria, T., Costa, V. F., Leite, G., Arthur, V., Coelho, S., & Baptista, A. (2023). Osmotic Stress Alleviation in *Saccharomyces cerevisiae* for High Ethanol Fermentations with Different Wort Substrates. In *Stresses* (Vol. 3, Issue 4, pp. 813–826). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/stresses3040055>
- Digieneni, Y., Samuel, R. T., & Iwekumo, W. (2019). Determination of the Actual Reflux Ratio of a Binary distillation Column using Excel. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 8(11), 26–30. <https://doi.org/10.9790/1813-0811022630>
- Dufey, A. (2006). *Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable : los grandes temas*. Londres: Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo.
- Dziugan, P., Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K. et al. Evaluation of the fermentation of high gravity thick sugar beet juice worts for efficient bioethanol production. *Biotechnol Biofuels* 6, 158 (2013). <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-158>

- Espinosa Cajas, F. J. (2013). Obtencion de etanol mediante hidrolisi alcalina, enzimatica y fermentacion a partir del excedente organico del banano variedad *Musa paradisiaca*. Quito.
- Fernandez, J., Lucas, H., & Ballesteros, M. (2000). Biocarburantes. Energias renovables.
- Filimonau, V. (2018). Historical Perspectives on Biofuels. In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences (Issue October). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11714-2>
- Giron Monterrosa, L. M., & Funes Flores, L. J. (2013). Obtencion de alcohol etilico por medio de fermentacion alcoholica de las cascarras de *Musa paradisiaca* (platano) utilizando como microorganismo productor *Sacharomyces cerevisiae* (levadura). San salvador.
- Green, J. D. (2005). DISTILLATION. In P. Worsfold, A. Townshend, & C. Poole (Eds.), Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition) (Second Edition, pp. 281–285). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00107-2](https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00107-2)
- Hansdah, D., Murugan, S., & Das, L. M. (2013). Experimental studies on a DI diesel engine fueled with bioethanol-diesel emulsions. En Alexandria Engineering Journal (Vol. 52, Issue 3, pp. 267-276). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.06.001>
- Hernandez Nodarse, M. T. (2007). Tendencias Actuales en la Produccion de Bioetanol.
- Ibrahim. H. (2011) Microalgae for Biofuels - A Review. Nigerian Research Journal of Chemical Sciences
- Lede, S. (2000). Los biocombustibles. Consejo argentino para la informacion y desarrollo de la biotecnologia.
- Lopez Jimenez, J. A., & Lozada Salgado, H. (2005). Obtencion de etanol anhidrido a partir de un proceso de destilacion con adcion de electrolitos.
- Malakar, S., Paul, S. K., & Jolvis Pou, K. R. (2019). Biotechnological interventions in beverage production. In Biotechnological Progress and Beverage Consumption: Volume 19: The Science of Beverages. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816678-9.00001-1>
- Manzanares Loaiza, S., & Tocto, J. (s.f.). Obtener alcohol etílico(etanol) a partir de las naranjas.
- Miller, G. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing

- sugar. *Analytical Chemistry*, 31 (3). pp. 426-428.
<https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Monsalve, J., Medina Perez, V. I., & Ruiz Colorado, A. A. (2006). Produccion de etanol a partir de la cascara de banano y de almidon de yuca. *Dyna*, 21-27.
- Norma Técnica Peruana (2009). NTP 212.030: Bebidas alcohólicas. Vinos. Determinación del grado alcohólico. 2da Edición
- Oyeyinka, B. O., & Afolayan, A. J. (2019). Comparative Evaluation of the Nutritive, Mineral, and Antinutritive Composition of *Musa sinensis* L. (Banana) and *Musa paradisiaca* L. (Plantain) Fruit Compartments. In *Plants* (Vol. 8, Issue 12, p. 598). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants8120598>
- Palandri, C., Giner, C., & Debnath, D. (2019). Technology, policy, and institutional options. *Biofuels, Bioenergy and Food Security*, 23–41. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803954-0.00002-4>
- Paniagua-Michel, J. (2015). Chapter 31 - Bioremediation with Microalgae: Toward Sustainable Production of Biofuels. In S.-K. Kim (Ed.), *Handbook of Marine Microalgae* (pp. 471–481). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00031-5>
- Pelaez , C., & Zapata, A. M. (2010). Produccion en continuo de etanol a partir de banano de rechazo(cascara y pulpa) empleando celulas inmovilizadas. *Tumbaga*, 49-60.
- Pérez Ávila, A. D. (s.f.). Evaluacion del procedo de produccion de etanol carburamte a partir de caña de azucarera, remolacha azucarera y maiz.
- Perotti, N. (2011). Procesos fermentativos industriales.
- Quizhpi Lopez, L. F. (2008). Obtencion de etanol a partir de los residuos organicos de la seccion de frutas del mercado mayorista de Riobamba. Riobamba.
- Rico, A. L. J. (2021). Determining the Quality and Quantity of Bioethanol Production using Golden Shower (*Cassia fistula*) Fruit. *Baghdad Science Journal*, 18(1), 722–727. [https://doi.org/10.21123/BSJ.2021.18.1\(SUPPL.\).0722](https://doi.org/10.21123/BSJ.2021.18.1(SUPPL.).0722)
- Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El cotidiano*, 75-82.
- Sansen O., L., & Vargas F., M. (2009). Obtencion de etanol por medio de la fermentacion alcoholioca del mango. Maracaibo.
- Shah, K. R., Vyas, R., & Patel, G. (2019). Bioethanol Production From Pulp Of Fruits. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 12(2), 464–471.

<https://doi.org/10.21786/bbrc/12.2/32>

- Srikanth, S., Swathi, M., Tejaswini, M., Sharmila, G., Muthukumaran, C., Jaganathan, M. K. y Tamilarasan, K. (2014). Statistical optimization of molasses based exopolysaccharide and biomass production by *Aureobasidium pullulans* MTCC 2195. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(3), 7-12.
- Srilekha Yadav, K., Naseeruddin, S., Sai Prashanthi, G., Sateesh, L., & Venkateswar Rao, L. (2011). Bioethanol fermentation of concentrated rice straw hydrolysate using co-culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia stipitis*. En *Bioresource Technology* (Vol. 102, Issue 11, pp. 6473-6478). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.019>
- Kumar, R., & Sureshkumar, K. (2021). Value Added Bioethanol Fuel from Waste Decayed Manilkara Zapota Fruit. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1130(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1130/1/012017>
- Tgarguifa, A., Abderafi, S., & Bounahmidi, T. (2017). Modeling and optimization of distillation to produce bioethanol. In *Energy Procedia* (Vol. 139, pp. 43–48). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.170>
- Tomasik, P., & Horton, D. (2012). Enzymatic conversions of starch. In *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry* (1st ed., Vol. 68). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396523-3.00001-4>
- Torres y Carrera. (2010). *Biocombustibles*.
- Vigo, A., Barrera C. (2015). Obtención de bioetanol a partir de los residuos fermentables de mango y determinación de parámetros óptimos de destilación. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*. 2 (2):31. DOI:<https://doi.org/10.26495/icti.v2i2.256>
- Wong, Y. C., & Sanggari, V. (2014). Bioethanol Production from Sugarcane Bagasse using Fermentation Process. En *Oriental Journal of Chemistry* (Vol. 30, Issue 2, pp. 507-513). Oriental Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.13005/ojc/300214>
- Williams, C. F. (2022). Microbial Metabolism. In N. Rezaei (Ed.), *Encyclopedia of Infection and Immunity* (pp. 363–376). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818731-9.00188-9>
- Williams, C. F. (2022). Microbial Metabolism. In N. Rezaei (Ed.), *Encyclopedia of Infection and Immunity* (pp. 363–376). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818731-9.00188-9>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Proceso de elaboración de mosto de pulpa de plátano.



Figura 15. Construcción de los biodigestores para elaboración de las unidades experimentales (bidones de plástico).



Figura 16. Pelado de plátano.

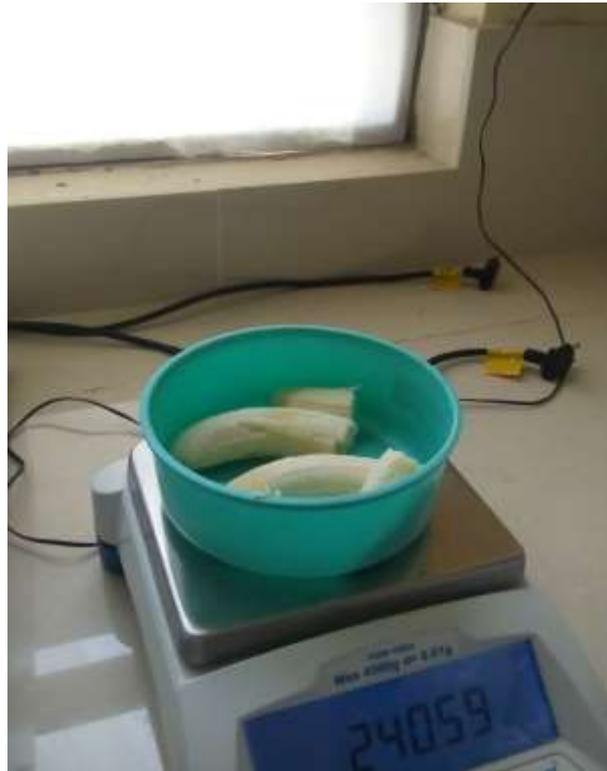


Figura 17. Pesado del plátano.



Figura 18. Triturado de plátano.



Figura 19. Los tres bidones con sus respectivas muestras. De izquierda a derecha, unidades experimentales R1, R2 y R3.



Figura 20. Medición de pH y Grados Brix en el Instituto de Investigación de Agroindustria.



Figura 21. Centrifugación de muestras en el laboratorio de investigación y desarrollo de productos agroindustriales, centrifuga LMC-4200R.

Anexo 2. Proceso de destilación de mosto fermentado de pulpa de plátano.



Figura 22. Frascos vacíos empleados para la medición de muestra de destilado.



Figura 23. Destilado en el laboratorio de operaciones unitarias de agroindustria.



Figura 24. Panel de control del equipo de destilación, equipo destilador continuo.



Figura 25. Etanol obtenido, equipo destilador continuo.



Figura 26. Los instrumentos para la medición de densidad, grados alcohólicos, índice de refracción. A: refractómetro; B: Densímetros.

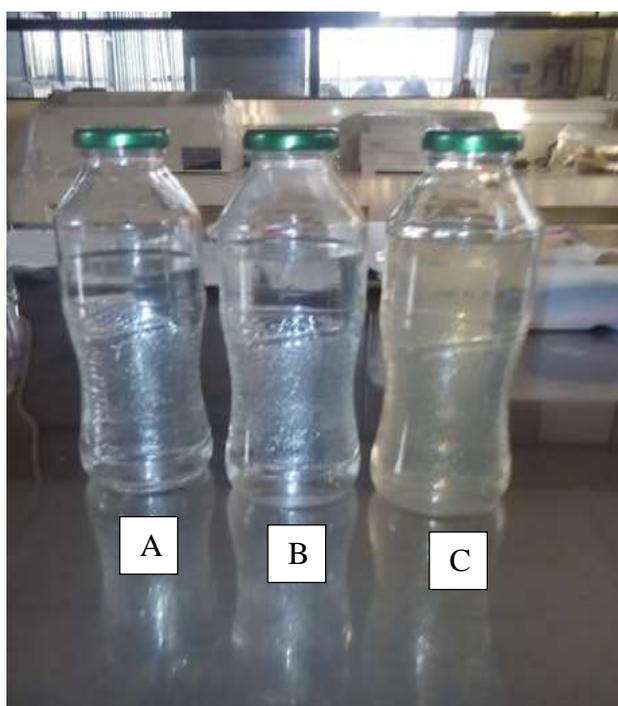


Figura 27. Resultado final de la destilación. A: Relación R1; B: Relación R2; C: Relación R3.

Anexo 3. Parámetros de destilación de mostos

Destilación de la relación Mosto: Agua 20:50 (R1):

La destilación se llevó a cabo con lo siguiente:

- Relación de Mosto: Agua = (2L de Mosto) / (4L de Agua + 7g de levadura diluida en 7 L)
- Volumen en D1 = 300ml de mosto
- densidad del mosto = 987.8814 Kg/m³ (T° = 22°C)
- PH de mosto = 4.12
- Índice de refracción de mosto = 1.3358
- Volumen en el calderín C1: 2400ml

La destilación de la Relación Mosto: Agua 1: se dio bajo los parámetros de destilación de:

- Potencia de la resistencia del calderín C1 = 800 Watts
- Caudal de alimentación a la columna = 3 L/h
- Razón de reflujo (t abierto/ t cerrado) = 1 seg/1 seg
- Presión de trabajo = 1 atm.

En estas condiciones iniciales y con los parámetros de operación de la Unidad de Destilación Continua modelo UDC/EV, se logró obtener:

- Volumen de destilado = 350 ml
- Grados Alcohólicos = 22 °GL
- Volumen de Cola = 2700ml
- IR del destilado = 1.3415
- densidad del destilado = 967.9242 Kg/m³ (T° = 22°C)

Destilación de la relación Mosto: Agua 30:40 (R2):

La destilación se llevó a cabo con lo siguiente:

- Relación de Mosto: Agua = (3L. de Mosto) / (3L de Agua + 7g de levadura diluida en 7L.)
- Volumen en D1 = 300 ml de mosto

- densidad del mosto = 994.8664 Kg/m³ (T° = 22°C)
- PH de mosto = 4.10
- Índice de refracción de mosto = 1.3377
- Volumen en el calderín C1: 200 ml

La destilación de la Relación Mosto: Agua 2: se dio bajo los parámetros de destilación de:

- Potencia de la resistencia del calderín C1 = 800 Watts
- Caudal de alimentación a la columna = 3 L/h
- Razón de reflujo (t abierto/ t cerrado) = 2 seg/1 seg
- Presión de trabajo = 1 atm.

Con base en las condiciones iniciales y los parámetros de operación de la Unidad de Destilación Continua modelo UDC/EV, se obtuvo lo siguiente:

- Volumen de destilado = 420 ml
- Grados Alcohólicos = 30 °GL
- Volumen de Cola = 2700ml
- IR del destilado = 1.3442
- densidad del destilado = 957.9456 Kg/m³ (T° = 22°C)

Destilación de la relación Mosto: Agua 40:30 (R3).

La destilación se llevó a cabo con lo siguiente:

- Relación de Mosto:Agua = (4L. de Mosto) / (2L. de Agua + 7g de levadura diluida en 7L.)
- Volumen en D1 = 300 ml de mosto
- Densidad del mosto = 996.8621 Kg/m³ (T° = 22°C)
- PH de mosto = 4.03
- Índice de refracción de mosto = 1.3386
- Volumen en el calderín C1: 2400ml

La destilación de la Relación Mosto:Agua 3: se dio bajo los parámetros de destilación de:

- Potencia de la resistencia del calderín C1 = 800 Watts
- Caudal de alimentación a la columna = 3 L/h
- Razón de reflujo (t abierto/ t cerrado) = 3 seg/1 seg
- Presión de trabajo = 1 atm.

En estas condiciones iniciales y con los parámetros de operación de la Unidad de Destilación Continua modelo UDC/EV, se lograron los siguientes resultados:

- Volumen de destilado = 450 ml
- Grados Alcohólicos = 35 °GL
- Volumen de Cola = 2700ml
- IR del destilado = 1.3479
- densidad del destilado = 950.9392 Kg/m³ (T° = 22°C)

Anexo 4. Datos experimentales de la fermentación Mosto: Agua 20:50 (R1)

Tabla 25. Datos de biomasa réplicas N° 1, 2 y 3 Tratamiento R1

Tiempo (días)	Biomasa 1	Biomasa 2	Biomasa 3	Biomasa promedio	D.E. Biomasa
0	1	1	1	1	0
1	1.0591	1.3328	1.1781	1.19	0.137237495
2	1.9758	1.6732	1.691	1.78	0.169801178
3	2.0532	2.4544	2.5724	2.36	0.272168477
4	2.664	3.0488	3.1672	2.96	0.263090555
5	2.7225	2.86	2.6675	2.75	0.09915266
6	2.1112	2.4128	2.436	2.32	0.181197792

Tabla 26. Datos de azúcares réplicas N° 1, 2 y 3 tratamiento R1

Tiempo (días)	Azúcares 1	Azúcares 2	Azúcares 3	Azúcares promedio	D.E. Azúcares
0	99.7524	105.798	96.7296	100.76	4.61740327
1	91.6782	96.5547	104.3571	97.53	6.39546979
2	71.3545	74.3589	79.6166	75.11	4.18194781
3	74.1506	61.0266	61.6828	65.62	7.39499844
4	38.9197	41.9808	50.2895	43.73	5.8832698
5	31.0662	28.8696	34.2042	31.38	2.68110838
6	16.1357	18.4926	19.7617	18.13	1.83999404

Tabla 27. Datos de bioetanol réplica N° 1, 2 y 3 tratamiento R1

Tiempo (días)	Bioetanol 1	Bioetanol 2	Bioetanol 3	Bioetanol promedio	D.E. Bioetanol
0	0	0	0	0	0
1	1.3923	1.4994	1.6983	1.53	0.15527804
2	6.0175	7.1775	8.555	7.25	1.27030262
3	16.8817	15.0788	17.2095	16.39	1.1473
4	22.2144	24.297	22.9086	23.14	1.06040802
5	27.2181	29.3118	33.2001	29.91	3.03553347
6	26.3784	30.9264	33.6552	30.32	3.67610463

Anexo 5. Datos experimentales de la fermentación Mosto: Agua 30:40 (R2)

Tabla 28. Datos de biomasa réplicas N° 1, 2 y 3 Tratamiento R2

Tiempo (días)	Biomasa 1	Biomasa 2	Biomasa 3	Biomasa promedio	D.E. Biomasa
0	1	1	1	1	0
1	1.1125	1.4	1.2375	1.25	0.14415703
2	1.6198	2.0384	1.8018	1.82	0.20989264
3	2.1093	2.6544	2.3463	2.37	0.27332173
4	2.8302	3.5616	3.1482	3.18	0.36673549
5	3.5328	4.1856	3.8016	3.84	0.32808974
6	2.9815	3.752	3.3165	3.35	0.38634085

Tabla 29. Datos de azúcares réplicas N° 1, 2 y 3 Tratamiento R2

Tiempo (días)	Azúcares 1	Azúcares 2	Azúcares 3	Azúcares promedio	D.E. Azúcares
0	108.3258	114.891	105.0432	109.42	5.01425433
1	102.96	109.2	99.84	104	4.76587872
2	88.0605	93.3975	85.392	88.95	4.07620108
3	70.1811	74.4345	68.0544	70.89	3.24858791
4	46.2978	56.1816	53.5806	52.02	5.12337583
5	38.4824	49.4149	43.2927	43.73	5.47935329
6	30.0086	30.5748	24.3466	28.31	3.44406014

Tabla 30. Datos de bioetanol réplicas N° 1, 2 y 3 Tratamiento R2

Tiempo (días)	Bioetanol 1	Bioetanol 2	Bioetanol 3	Bioetanol promedio	D.E. Bioetanol
0	0	0	0	0	0
1	1.4365	1.8928	1.7407	1.69	0.23233659
2	9.4605	12.4656	11.4639	11.13	1.53012202
3	17.468	22.4305	19.6515	19.85	2.48719787
4	23.953	31.5616	29.0254	28.18	3.87410949
5	27.3388	36.3406	36.3406	33.34	5.19719165
6	30.617	40.3424	37.1006	36.02	4.9519313

Anexo 6. Datos experimentales de la fermentación Mosto: Agua 40:30 (R3)

Tabla 31. Datos de biomasa réplicas N° 1, 2 y 3 Tratamiento R3

Tiempo (días)	Biomasa 1	Biomasa 2	Biomasa 3	Biomasa promedio	D.E. Biomasa
0	1	1	1	1	0
1	1.1392	1.4336	1.2672	1.28	0.1476168
2	1.717	2.3028	2.0402	2.02	0.29342195
3	2.4475	3.08	2.7225	2.75	0.31714547
4	3.3108	4.1664	3.6828	3.72	0.42901133
5	4.563	5.7291	4.9179	5.07	0.59774418
6	4.149	4.9788	4.7022	4.61	0.42251348

Tabla 32. Datos de azúcares réplicas N° 1, 2 y 3 Tratamiento R3

Tiempo (días)	Azúcares 1	Azúcares 2	Azúcares 3	Azúcares promedio	D.E. Azúcares
0	126.7299	134.4105	122.8896	128.01	5.86615515
1	124.5519	132.1005	120.7776	125.81	5.76533848
2	94.4262	100.149	91.5648	95.38	4.3708607
3	76.4577	81.0915	74.1408	77.23	3.53912321
4	55.5805	67.446	64.3235	62.45	6.1506117
5	42.4512	54.5112	47.7576	48.24	6.04445468
6	32.171	32.778	26.101	30.35	3.69223686

Tabla 33. Datos de bioetanol réplicas N° 1, 2 y 3 Tratamiento R3

Tiempo (días)	Bioetanol 1	Bioetanol 2	Bioetanol 3	Bioetanol promedio	D.E. Bioetanol
0	0	0	0	0	0
1	1.5066	2.0088	2.0646	1.86	0.30732244
2	10.3113	14.2576	13.6211	12.73	2.11869425
3	21.7152	29.2032	23.9616	24.96	3.84254316
4	31.671	41.7312	38.3778	37.26	5.12240311
5	37.597	49.9765	49.9765	45.85	7.14730766
6	41.327	51.051	52.9958	48.45	6.25165733

Anexo 7. Datos experimentales de la fermentación Control Mosto: Agua 35:35

Tabla 34. Datos de biomasa réplicas N° 1, 2 y 3 del tratamiento control

Tiempo (días)	Biomasa 1	Biomasa 2	Biomasa 3	Biomasa promedio	D.E. Biomasa
0	1	1	1	1	0
1	1.1303	1.4224	1.2573	1.27	0.14646354
2	1.7088	2.1504	1.9008	1.92	0.2214252
3	2.2784	2.8672	2.5344	2.56	0.2952336
4	3.0705	3.864	3.4155	3.45	0.39787341
5	4.094	4.8505	4.4055	4.45	0.38020817
6	3.5422	4.4576	3.9402	3.98	0.45899599

Tabla 35. Datos de azúcares réplicas N° 1, 2 y 3 del tratamiento control

Tiempo (días)	Azúcares 1	Azúcares 2	Azúcares 3	Azúcares promedio	D.E. Azúcares
0	104.247	110.565	101.088	105.3	4.82545221
1	94.05	99.75	91.2	95	4.35344691
2	91.2483	96.7785	88.4832	92.17	4.22376002
3	73.3194	77.763	71.0976	74.06	3.39385556
4	50.9347	61.8084	58.9469	57.23	5.63650132
5	29.92	38.42	33.66	34	4.26018779
6	24.8252	25.2936	20.1412	23.42	2.84916597

Tabla 36. Datos de bioetanol réplicas N° 1, 2 y 3 del tratamiento control

Tiempo (días)	Bioetanol 1	Bioetanol 2	Bioetanol 3	Bioetanol promedio	D.E. Bioetanol
0	0	0	0	0	0
1	1.5045	1.9824	1.8231	1.77	0.24333477
2	10.1405	13.3616	12.2879	11.93	1.64010384
3	19.7208	25.3233	22.1859	22.41	2.80796495
4	27.812	36.6464	33.7016	32.72	4.4982563
5	32.4638	43.1531	43.1531	39.59	6.17147023
6	34.2125	45.08	41.4575	40.25	5.53346015

9	moam.info Fuente de Internet	<1 %
10	pdfcoffee.com Fuente de Internet	<1 %
11	repositoriodspace.unipamplona.edu.co Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to ueb Trabajo del estudiante	<1 %
13	revistas.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	www.biotecnologica.com Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	repository.unad.edu.co Fuente de Internet	<1 %
17	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	<1 %
19	repositorio.ucsg.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
20	worldwidescience.org	

	Fuente de Internet	<1 %
21	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
22	www.scielo.org.pe Fuente de Internet	<1 %
23	es.myubi.tv Fuente de Internet	<1 %
24	pdfcookie.com Fuente de Internet	<1 %
25	Submitted to ECCI Trabajo del estudiante	<1 %
26	Submitted to Universidad del Valle de Guatemala Trabajo del estudiante	<1 %
27	dspace.uces.edu.ar:8180 Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.uea.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
30	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	revistas.ut.edu.co Fuente de Internet	<1 %

		<1 %
32	helvia.uco.es Fuente de Internet	<1 %
33	Submitted to University of Melbourne Trabajo del estudiante	<1 %
34	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
35	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
36	riull.ull.es Fuente de Internet	<1 %
37	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
38	Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas Trabajo del estudiante	<1 %
39	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
40	www.lared.com.co Fuente de Internet	<1 %
41	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	<1 %
42	revistaorinoquia.unitropico.edu.co Fuente de Internet	

		<1 %
43	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
44	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia Trabajo del estudiante	<1 %
45	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD Trabajo del estudiante	<1 %
46	examinar.net Fuente de Internet	<1 %
47	eelalnx01.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
48	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
49	repositorio.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
50	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1 %
51	1library.co Fuente de Internet	<1 %
52	dspace.uclv.edu.cu Fuente de Internet	<1 %

53	ebin.pub Fuente de Internet	<1 %
54	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1 %
55	ciab2012.org Fuente de Internet	<1 %
56	dicyt.uajms.edu.bo Fuente de Internet	<1 %
57	learntechlib.org Fuente de Internet	<1 %
58	repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080 Fuente de Internet	<1 %
59	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
60	www-cpsv.upc.es Fuente de Internet	<1 %
61	www.aemac.org Fuente de Internet	<1 %
62	www.infoteca.cnptia.embrapa.br Fuente de Internet	<1 %
63	Submitted to Universidad TecMilenio Trabajo del estudiante	<1 %
64	www.coursehero.com	

Fuente de Internet

<1%

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía Activo