Design of an ethanol production line using molasses at a sugarcane mill to meet national demand

Caramutti Silva Oscar Franco[1]; Peche Cieza Diana[2]; Arroyo Ulloa Maximiliano Rodolfo[3]
[1,2,3]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, *tofranco27@hotmail.com, dpeche@usat.edu.pe, marroyo@usat.edu.pe*

Abstract*– This study proposes the design of an anhydrous ethanol production line using molasses as feedstock at a sugarcane mill located in the Lambayeque region, with the purpose of contributing to meet national demand and adding value to this by – product. To determine the feasibility of the proposal, commercial, technical – technological, economic – financial, and environmental aspects were evaluated. The market analysis identified an unmet national demand based on the historical behavior of recorded ethanol imports, and the project's demand was projected for the 2026 – 2031 period through linear regression, considering a growing market share of between 26% and 31%. From the technical – technological perspective, the proposed production line was designed with an annual capacity of 4,896,543 gallons of ethanol, equivalent to a daily output of 64,359.17 L, and a total area of 1,304.70 m² was determined by applying the Guerchet method and Systematic Layout Planning (SLP), ensuring an efficient plant area layout. The economic – financial analysis showed favorable results, with a Net Present Value of S/ 24,956,940.65, an Internal Rate of Return of 79%, a Benefit/Cost ratio of 1.15, and an investment payback period of 1 year and 8 months, confirming the economic viability of the project. Likewise, the environmental assessment carried out using the Leopold matrix identified the generation of effluents such as vinasse, biogenic CO_2 emissions, and process water as the main environmental impacts; for this purpose, mitigation measures aimed at reducing their effects on the environment were proposed, thereby strengthening the sustainability and valorization of the by – product.

***Keywords*-- Ethanol, molasses, production line, sugarcane mill**

Diseño de una línea de producción de etanol a partir de melaza en fábrica azucarera para satisfacer la demanda nacional

Caramutti Silva Oscar Franco[1]; Peche Cieza Diana[2]; Arroyo Ulloa Maximiliano Rodolfo[3]
[1,2,3]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, *tofranco27@hotmail.com, dpeche@usat.edu.pe, marroyo@usat.edu.pe*

Resumen*– La presente investigación propone el diseño de una línea de producción de etanol anhidro a partir de melaza en una fábrica azucarera ubicada en la región Lambayeque, con el propósito de contribuir a satisfacer la demanda nacional y valorizar dicho subproducto. Para determinar la viabilidad de la propuesta, se evaluaron los aspectos comercial, técnico – tecnológico, económico – financiero y ambiental. En el análisis de mercado se identificó una demanda nacional insatisfecha a partir del comportamiento histórico de las importaciones registradas de etanol y se proyectó la demanda del proyecto para el periodo 2026 – 2031 mediante regresión lineal, considerando una participación creciente del mercado entre 26% y 31%. Desde la perspectiva técnico – tecnológica, se diseñó una línea con una capacidad anual de 4 896 543 galones de etanol, equivalente a una producción diaria de 64 359,17 L, y se determinó un área total de 1 304,70 m^2 aplicando los métodos de Guerchet y Systematic Layout Planning (SLP). El análisis económico – financiero evidenció resultados favorables, con un Valor Actual Neto de S/24 956 940,65, una Tasa Interna de Retorno de 79%, una relación Beneficio/Costo de 1,15, y un periodo de recuperación de la inversión de 1 año y 8 meses. Asimismo, la evaluación ambiental mediante la matriz de Leopold permitió identificar como principales impactos ambientales la generación de efluentes como la vinaza, emisiones de CO_2 biogénico y aguas de proceso, para ello, se propusieron medidas de mitigación orientadas a reducir sus efectos sobre el entorno, fortaleciendo la sostenibilidad y el aprovechamiento del subproducto.

Palabras clave*-- Etanol, melaza, línea de producción, industria azucarera.

I. INTRODUCCIÓN

La industria azucarera desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico de diferentes países, entre los cuales destacan Brasil, India, Tailandia, China y Pakistán, situándose los dos primeros como líderes globales con una producción anual de 752,9 y 405,4 millones de toneladas de azúcar respectivamente [1]. Además de ser partícipe en la creación de empleo y uno de los bienes esenciales más utilizados alrededor del mundo. Asimismo, es responsable de la generación de diferentes subproductos que, correctamente gestionados contribuyen al desarrollo económico y la reducción del impacto ambiental generado por dicha industria. Entre estos hallamos al bagazo, empleado como biocombustible dentro de las fábricas; la cachaza, utilizada como fertilizante y acondicionador de suelos; y la melaza, un residuo viscoso obtenido a través de la cristalización final del azúcar.

En el contexto internacional, la melaza ha cobrado importancia por múltiples aplicaciones. En el año 2023, las exportaciones de melaza alcanzaron un valor de 1 050 millones de dólares, con India liderando el mercado con exportaciones por 266 millones de dólares, seguida de Indonesia y Guatemala. Perú en el año 2025 exportó melaza por un valor de 8,84 millones de dólares, consolidando el puesto 23 a nivel global, con el principal destino siendo Ecuador con una participación de casi el 99% [2].

Asimismo, el Perú se posiciona en el puesto 21 a nivel mundial en la producción de azúcar, alcanzando una cifra anual de 1,3 millones de toneladas. Además, de acuerdo a estadísticas recolectadas por el SIEA, Lambayeque es el segundo departamento con mayor producción azucarera del país, al registrar 265 200 toneladas en 2025, solo por detrás de La Libertad, que alcanzó las 601 900 toneladas [3]. Esto convertiría a la región norte en uno de los principales puntos de exportación.

La empresa azucarera analizada en el presente trabajo constituye una de las fábricas más importantes de la región Lambayeque, siendo partícipe del 37% de la azúcar elaborada a nivel departamental. No obstante, afronta un reto significativo, pues genera en promedio 94,42 toneladas diarias de melaza, aprovechándose solamente 2,68 toneladas para la elaboración de colorante/caramelo empleado en centrífugas comerciales, mientras que el resto se destina a la venta a diferentes refinerías de la región, según la demanda. Si bien una cierta parte se vende, las elevadas cantidades anuales constituyen un gran problema medioambiental debido a la dificultad para tratarla o desecharla, no obstante, al ser una sustancia rica en azúcares fermentables (50 – 55%) puede ser empleada para la fabricación de distintos productos, tales como el etanol [4].

Ante este panorama se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Es factible la implementación de una línea de producción de etanol a partir de la melaza en una fábrica azucarera para satisfacer la demanda? Esta investigación tiene como objetivo proponer una línea de producción de etanol a partir de melaza para satisfacer la demanda del mercado.

Esta investigación se justifica por la necesidad de mitigar los impactos ambientales derivados por el manejo inadecuado

de dicho subproducto (melaza), así como las oportunidades que ofrece en el creciente mercado de biocombustibles, mezclado con gasolina en las formulaciones E10 o E85. Cobrando relevancia en un contexto donde las emisiones de CO_{2eq} ascienden a 105 139 millones a nivel nacional, de los cuáles más de un 30% es responsable el sector energía (industrias, transporte, etc.) [5].

Asimismo, el etanol no solo se posiciona como una alternativa energética limpia y renovable, alineada con las tendencias de sostenibilidad y la transición hacia una economía circular, sino que, en términos económicos, transformar la melaza en etanol representa un incremento de su valor agregado en un 122,7%. Además, este proyecto contribuye al cumplimiento de distintos ODS instaurados por la ONU, más específicamente de los ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura; y ODS 7: Energía Asequible y no contaminante.

II. Revisión de literatura

El etanol (C_2H_5OH), también denominado alcohol etílico, es un compuesto químico producido mediante la fermentación de azúcares fermentables, principalmente glucosa y fructosa. Estos azúcares pueden obtenerse a partir de materias primas que contienen sacarosa o polisacáridos, como el almidón y la celulosa. La melaza es particularmente valorada en este proceso, que contiene aproximadamente 50% de azúcares fermentables (33% de sacarosa, 9% de glucosa y 8% de fructosa), además de su abundancia y bajo costo, convirtiéndola en una materia prima ideal [4]. El proceso productivo del etanol se divide en tres etapas: preparación, fermentación y destilación.

Resulta conveniente identificar ciertos aspectos clave de una línea de producción. Para empezar, se define como línea de producción al conjunto organizado y secuencial de estaciones de trabajo, que pueden ser manuales o automatizadas, y que representan las etapas fundamentales del proceso productivo, incluyendo aquellas que aseguran el cumplimiento de normas y estándares nacionales e internacionales. La eficiencia de esta línea depende de la adecuada disposición de máquinas y estaciones, así como de la cualificación del personal. Se mide en términos de velocidad y rendimiento de la producción, expresados a través de la productividad, que puede definirse tanto en función de la producción relativa a los insumos (o tiempo base y ciclo) como en términos de mano de obra (producción por operario) y eficiencia económica (ventas en relación a costos) [6].

Asimismo, métodos como el de Guerchet permiten determinar el área necesaria para cada estación considerando la superficie estática (espacio ocupado por equipos), la superficie de gravitación (área de movimiento alrededor de la maquinaria) y la superficie de evolución (zona de desplazamiento para personal y materiales). Por otra parte, el Systematic Layout Planning (SLP) nos permite organizar el diseño de una planta y línea de producción, facilitando el flujo de materiales y reducción de costos de transporte interno. Su metodología se basa en el desarrollo de una tabla y un diagrama relacional de actividades, así como uno de espacios y del layout del proceso [7].

Además de las metodologías y parámetros expuestos con anterioridad, cuyo fin último es optimizar la productividad dentro de una fábrica, es esencial tomar en consideración aquellas prácticas dirigidas al análisis del impacto ambiental provocado por un proyecto. De acuerdo con el Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) , dicho proceso consta de 3 etapas fundamentales: formulación del proyecto (desarrollo de estudios técnicos y conceptualización), elaboración del estudio ambiental (análisis preliminar) y evaluación ambiental (clasificación y aprobación) [8].

Entre las herramientas más utilizadas para este fin se encuentra la matriz de Leopold, la cual permite identificar y valorar las interacciones entre las acciones del proyecto y los componentes del medio físico, biológico y social. Su aplicación se basa en la asignación de ponderaciones de magnitud e importancia, facilitando la identificación de impactos ambientales y la formulación de medidas de mitigación.

III. Materiales y métodos

Esta investigación corresponde a una de tipo descriptivo, puesto que su enfoque principal comprende la descripción de los aspectos técnicos considerando información relacionada a la elaboración de etanol a partir de la melaza, tal como etapas del proceso, maquinarias e insumos empleados [9]. Dicha información nos permitió llevar a cabo un análisis financiero y ambiental, ofreciendo un panorama amplio de la propuesta que servirá como base para su implementación.

La investigación corresponde a un análisis de tipo cuantitativo, dado que los resultados se fundamentaron en base a proyecciones realizadas a partir de la recolección de diferentes datos numéricos [9]. Asimismo, es de tipo no experimental, puesto que no se llevó a cabo la manipulación de las variables.

Primeramente, se realizó un análisis documentario de artículos, informes y fuentes oficiales, como Aduanas y Trade Map, utilizando la partida arancelaria 2207.10.00.00 (Alcohol etílico sin desnaturalizar con grado alcohólico volumétrico superior o igual a 80% vol.). A partir de ello, se evaluó la viabilidad comercial del proyecto, realizando una proyección de la demanda insatisfecha y de los precios nacionales.

Posteriormente, se aplicaron herramientas de ingeniería de métodos a partir del plan de producción proyectado hacia los siguientes cinco años. Mediante un balance de materia, representado en un diagrama de bloques, se cuantificaron las entradas y salidas del proceso, permitiendo determinar la capacidad anual de la planta, así como indicadores claves de desempeño (KPIs). Finalmente, se empleó el método Guerchet para optimizar la distribución de la línea, considerando los requerimientos espaciales de los equipos y la configuración física de las instalaciones.

Con base en los resultados obtenidos, se realizó la cotización de la inversión tangible e intangible. Asimismo, se determinaron los costos directos e indirectos de fabricación, así

como los costos variables y fijos de producción para, posteriormente, determinar el estado de ganancias y pérdidas y el flujo de caja. Se emplearon indicadores como la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI). A partir de ello, se efectuaron los respectivos análisis de sensibilidad en función de las variables de precio de venta y costo de materiales directos, con el objetivo de determinar el nivel de riesgo del proyecto.

Para evaluar la viabilidad ambiental del proyecto, se empleó la matriz de Leopold, identificando y valorando los impactos ambientales según su magnitud e importancia. Consiguientemente, se propusieron medidas de prevención y mitigación para reducir los impactos negativos más signficativos.

IV. Resultados

De acuerdo a la resolución ministerial N°469 – 2021, se exige que al menos el 7,8% del volumen de gasohol elaborado provenga de etanol [10]. Sin embargo, la capacidad instalada nacional resulta insuficiente para cubrir este requerimiento desde 2015, alcanzando en 2025 una producción equivalente al 82% de la demanda (250 a 304 millones de litros) [11].

Para responder a dicha tendencia, resulta imprescindible incrementar la producción local. En consecuencia, se consideró que la demanda insatisfecha esté determinada por el número de importaciones, las cuales corresponden a la cantidad faltante para hacer frente a la demanda nacional. Dichos datos históricos son expuestos en la TABLA I.

TABLA I
IMPORTACIONES DE ETANOL 2018 – 2025 A NIVEL NACIONAL

Año	Importaciones (gal US)
2018	10 374 067
2019	7 854 739
2020	20 046 134
2021	27 342 496
2022	26 754 906
2023	12 501 980
2024	8 903 179
2025	13 311 600

Fuente: **[12]**

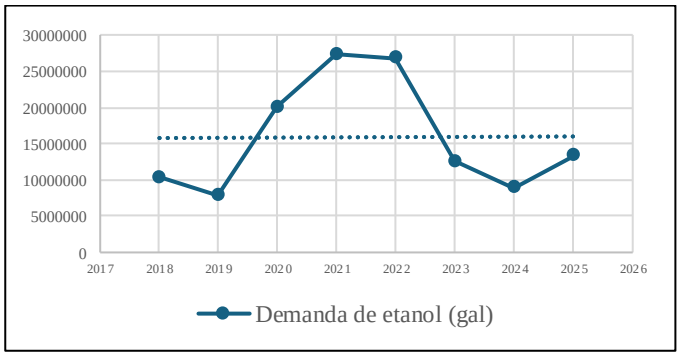


Fig. 1 Importaciones de etanol 2018 – 2025 a nivel nacional

Posteriormente, se realizó una proyección para los siguientes 6 años (2026 – 2031), aplicando un modelo de regresión lineal. Empleando la ecuación (1), obteniendo como resultado que la proyección de la demanda se mantiene constante, tal y como se puede apreciar en la TABLA II.

$$Y = a + bX \quad (1)$$

Donde Y = Variable dependiente; a = Intercepto; b = Pendiente y X = Variable independiente.

TABLA II
PROYECCIÓN DE IMPORTACIONES DE ETANOL 2026 – 2031 A NIVEL NACIONAL

Año	Importaciones (gal US)
2026	13 725 550
2027	14 139 500
2028	14 553 450
2029	14 967 400
2030	15 381 350
2031	15 795 300

Fuente: En base a **[12]**

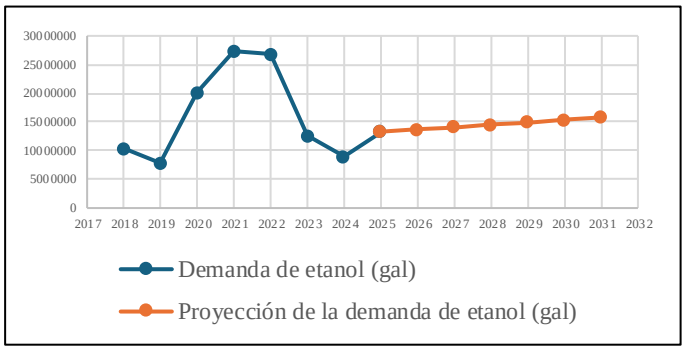


Fig. 2 Pronóstico de las importaciones de etanol 2026 – 2031 a nivel nacional

Tomando como referencia la demanda insatisfecha para el periodo 2026 – 2031, se estimó la participación del proyecto en el mercado acorde a la disponibilidad proyectada de melaza, basada en datos históricos de cinco años, así como un rendimiento de 230 L/t de etanol [13]. Los resultados indican que la planta cubriría aproximadamente el 26% de la demanda proyectada. Dichos datos son apreciables en la TABLA III.

TABLA III
DEMANDA DEL PROYECTO

Año	Proyección de la demanda insatisfecha (gal)	Porcentaje de participación	Demanda proyectada (gal)
2026	13 725 550	26%	3 568 643
2027	14 139 500	27%	3 817 665
2028	14 553 450	28%	4 074 966
2029	14 967 400	29%	4 340 546
2030	15 381 350	30%	4 614 405
2031	15 795 300	31%	4 896 543

Fuente: En base a **[12]**

Con el fin de realizar el plan de producción, se analizó la cantidad de materia prima existente en la empresa, en este caso, la melaza. Por tanto, se emplearon los reportes anuales pertenecientes al periodo 2020 – 2025 para realizar una proyección de la disponibilidad de recursos, hacia los años 2026 – 2031. Dichos datos son apreciables en la TABLA IV.

TABLA IV
DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA

Año	Cantidad (t)
2026	32 486,82
2027	34 258,38
2028	36 029,94
2029	37 801,50
2030	39 573,06
2031	41 344,62

Fuente: En base a datos de la empresa

Según la proyección sobre la disponibilidad de materia prima, se anticipa que el volumen de melaza será más que suficiente para cubrir la demanda estimada a lo largo del periodo 2026 – 2031 analizado**.** Con base a estos hallazgos se estructuró un plan de ventas detallado contemplando volúmenes anuales, trimestrales y mensuales observados en TABLA V.

TABLA V
PLAN DE VENTAS

Periodo	Unidades (gal)	Importe
1er mes	297 387	S/ 2 918 763,37
2do mes	297 387	S/ 2 918 763,37
3er mes	297 387	S/ 2 918 763,37
1er trimestre	892 161	S/ 8 756 290,11
2do trimestre	892 161	S/ 8 756 290,11
3ro trimestre	892 161	S/ 8 756 290,11
4to trimestre	892 161	S/ 8 756 290,11
Año 1	3 568 643	S/ 35 025 160,45
Año 2	3 817 665	S/ 39 084 681,62
Año 3	4 074 966	S/ 43 443 212,53
Año 4	4 340 546	S/ 48 111 262,95
Año 5	4 614 405	S/ 53 099 342,66
Año 6	4 896 543	S/ 58 417 961,43

Con base en el plan de ventas proyectado para el periodo 2026 – 2031, se elaboró el programa de producción de etanol para un horizonte de 6 años. Asimismo, se estableció un stock de seguridad equivalente al 10% de la producción mensual para asegurar la continuidad del suministro frente a posibles variaciones en la demanda o el abastecimiento de la melaza. La TABLA VI presenta el detalle de la producción, inventarios de cierre y ventas.

TABLA VI
PLAN DE PRODUCCIÓN

Periodo	Inv. Inicial (gal)	Producción (gal)	Inv. Total (gal)	Ventas	Inv. Final (gal)
Mes 1	0	327 126	327 126	297 387	29 739
Mes 2	29 739	297 387	327 126	297 387	29 739
Mes 3	29 739	297 387	327 126	297 387	29 739
Trimestre 1	-	921 899	-	892 161	29 739
Trimestre 2	29 739	892 161	921 899	892 161	29 739
Trimestre 3	29 739	892 161	921 899	892 161	29 739
Trimestre 4	29 739	892 161	921 899	892 161	29 739
Año 1	-	3 598 382	-	3 568 643	29 739
Año 2	29 739	3 817 665	3 847 404	3 817 665	29 739
Año 3	29 739	4 074 966	4 104 705	4 074 966	29 739
Año 4	29 739	4 340 546	4 370 285	4 340 546	29 739
Año 5	29 739	4 614 405	4 614 405	4 614 405	29 739
Año 6	29 739	4 896 543	4 896 543	4 896 543	29 739

De igual manera, se cuantificó la demanda de insumos necesarios para garantizar la continuidad operativa del sistema productivo. En la TABLA VII se detalla el MRP correspondiente.

TABLA VII
PLAN DE REQUERIMIENTO DE MATERIALES (MRP)

Insumo	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
Melaza (t)	29 290,83	31 075,79	33 170,22	35 332,04	37 561,26	39 857,86
H_2O (m^3)	87 836,50	93 189,20	99 469,92	105 952,73	112 637,63	119 524,61
H_2SO_4 (m^3)	212,30	225,24	240,42	256,09	272,25	288,90
$(NH_4)_2SO_4$ (t)	21,59	22,91	24,45	26,04	27,69	29,38
KH_2PO_4 (t)	10,80	11,45	12,22	13,02	13,84	14,69
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (t)	43,18	45,81	48,90	52,09	55,37	58,76
Saccharomyces cerevisiae (t)	345,44	366,50	391,20	416,69	442,98	470,07

En función del pico de producción proyectado para 2031, la capacidad diseñada de la planta se estableció en 4 896 543 galones anuales de etanol anhidro. Para el dimensionamiento de la operación, se consideró un calendario de trabajo de 24 días por mes, equivalente a una producción diaria de 17 001,89 galones (64 359,17 L). En contraste, la capacidad real, entendida como el volumen efectivo de etanol producido al considerar factores operativos como paradas programadas, perturbaciones del proceso y otras pérdidas, se estimó tomando como referencia la producción del primer año, correspondiente a 3 568 643 galones anuales. Bajo el mismo régimen, se identificó un valor promedio de 12 391,12 galones por día (46 905,50 L). Para determinar la capacidad utilizada se empleó (2).

$$\text{Capacidad utilizada} = \frac{Capacidad\ real}{Capacidad\ diseñada} \quad (2)$$

Tomando en consideración los valores previamente mencionados, se obtuvo un valor de:

$$\text{Capacidad utilizada} = \frac{46\,905{,}50\ l/d}{64\,359\ l/d}$$

$$\text{Capacidad utilizada} = 0{,}73 \approx 73\%$$

Como primer indicador, se calculó la productividad de materia prima, definida como la relación entre la masa de etanol obtenida y la melaza procesada. Esto se encuentra expresado en la ecuación (3).

$$\text{Productividad materia prima} = \frac{Producción\ obtenida}{Recursos\ necesarios} \quad (3)$$

Para su determinación se elaboró un balance de materia sobre un lote de 1 000 kg de melaza, de la cual se recuperaron 367 kg de etanol. El diagrama detallado de dicho balance se presenta en la figura 4

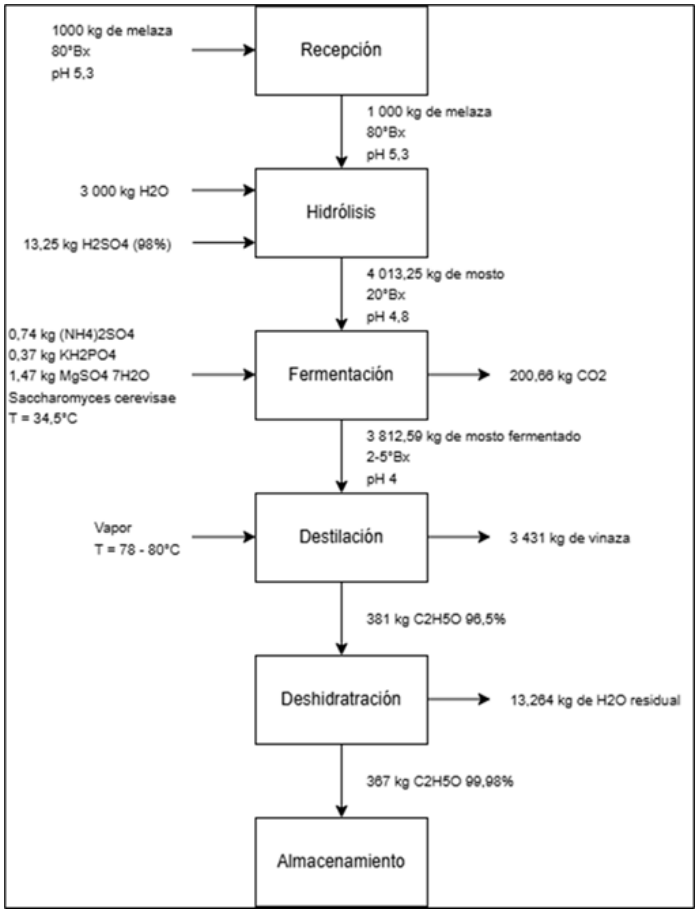


Fig. 3 Balance de materia

Reemplazando valores en función de lo mencionado anteriormente, se obtuvo:

$$\text{Productividad materia prima} = \frac{367 kg\ de\ etanol}{1\ 000\ kg\ de\ melaza}$$

$$\text{Productividad materia prima} = 0{,}367\ \frac{kg\ de\ etanol}{kg\ de\ melaza}$$

Asimismo, se realizó un balance de líneas, con el propósito de establecer el número mínimo de estaciones de trabajo, así como determinar la eficiencia global de la línea de producción. Para ello, se calculó el tiempo estándar de cada operación. Dichos indicadores se hallaron empleando las fórmulas (4), (5) y (6)

$$\text{Tiempo de ciclo} = \frac{Tiempo\ base}{Producción\ de\ cada\ máquina} \quad (4)$$

$$\text{N°Estaciones} = \frac{\sum Tiempo\ de\ cada\ área}{Tiempo\ de\ ciclo} \quad (5)$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{\sum Tiempo\ de\ cada\ área}{N°\ estaciones \times Tiempo\ de\ ciclo} \quad (6)$$

Reemplazando en (4) con los valores obtenidos por cada estación, se obtuvieron los siguientes tiempos:

$$\text{Recepción de MP} = \frac{60\ min/h}{4\ 197{,}82\ kg/h} = 0{,}01429\ min/kg$$

$$\text{Hidrólisis ácida} = \frac{60\ min/h}{16\ 846{,}91\ kg/h} = 0{,}00356\ min/kg$$

$$\text{Fermentación} = \frac{60\ min/h}{16\ 004{,}57\ kg/h} = 0{,}00375\ min/kg$$

$$\text{Destilación} = \frac{60\ min/h}{1\ 599{,}37\ kg/h} = 0{,}03752\ min/kg$$

$$\text{Deshidratación} = \frac{60\ min/h}{1\ 540{,}60\ kg/h} = 0{,}03895\ min/kg$$

Empleando dichos tiempos en (5) se calculó número de estaciones necesarias:

$$\text{N°estaciones} = \frac{0{,}09807\ min/kg}{0{,}03895\ min/kg}$$

$$\text{N°estaciones} = 2{,}518$$

$$\text{N°estaciones} = 3$$

A partir del número de estaciones se obtuvo la distribución expuesta en la figura 4.

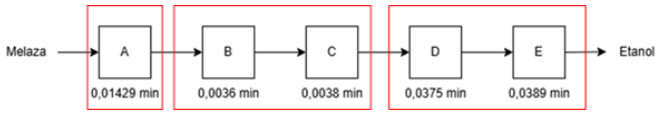


Fig. 4 Balance de líneas

Asimismo, la eficiencia global de la línea se estableció en:

$$\text{Eficiencia} = \frac{0{,}09807\ min/kg}{3 \times 0{,}03895\ min/kg} \times 100$$

$$\text{Eficiencia} = 83{,}93\%$$

Se determinó la cantidad de operarios requeridos para atender adecuadamente la línea de producción propuesta. Cabe señalar que el diseño de la planta considera una operación continua durante toda la semana, con un total de 288 días laborables al año y 3 turnos diarios. Para ello, se empleó la fórmula (7).

$$\text{N°Operarios} = \frac{Tiempo\ de\ operación \times Producción\ diaria}{Eficencia \times Tiempo\ disponible} \quad (7)$$

Reemplazando con los datos previamente calculados en (7) y, considerando que se trabajan 3 jornadas laborables, se obtuvo un valor de:

$$\text{N°Operarios} = \left(\frac{0{,}1\frac{min}{kg} \times 12\ 328{,}34\frac{kg}{turno}}{83{,}93\% \times 480\frac{min}{turno}}\right) \times 3$$

$$\text{N°Operarios} = 12\ \frac{\text{operarios}}{\text{día}}$$

Para el cálculo de la productividad de mano de obra, se empleó la ecuación (8).

$$\text{Productividad M.O} = \frac{Producción\ obtenida}{Mano\ de\ obra} \quad (8)$$

Considerando que al final de los 3 turnos, se obtiene un total de 12 328,34 kg de etanol, y se trabajan con 12 operarios a lo largo del día, se determinó el siguiente valor:

$$\text{Productividad M.O} = \frac{12\ 328{,}34\ kg\ de\ etanol}{12\ operarios}$$

$$\text{Productividad M. O} = 1\ 027{,}36\ kg\ de\ etanol/operario$$

Mediante un análisis comparativo de equipos y especificaciones técnicas, se definió la cantidad y capacidad de equipos requeridos para la planta: 2 reactores de agitación continua de 10 000 L, 6 fermentadores batch de 12 000 L, 2 columnas de destilación de 7 000 L y 1 evaporador al vacío de 3 100 L.

Con base en dicha información, se definió la distribución especial de cada zona operativa mediante el método de Guerchet, considerando áreas de equipos, operación, mantenimiento y circulación. Dichas superficies se determinaron mediate la aplicación secuencial de las ecuaciones (9), (10), (11), (12) y (13), obteniendo una superficie total de 1 304,70 $\boldsymbol{m^2}$. Lo dicho se encuentra presente en la TABLA VIII.

$$SS_e = L \times A \quad (9)$$

$$SS_t = SS_e \times n \quad (10)$$

$$Sg = SS_t \times N \quad (11)$$

$$Se = (SS_t + Sg) \times k \quad (12)$$

$$ST = SS_t + Sg + Se \quad (13)$$

Donde $\boldsymbol{SS_e}$ = Superficie estática por elemento; L = Largo; A = Ancho; $\boldsymbol{SS_t}$ = Superficie estática por estación; n = Número de elementos; $\boldsymbol{Sg}$ = Superficie gravitacional; N = Número de lados de uso; $\boldsymbol{Se}$ = Superficie de evolución; k = Coeficiente de evolución y $\boldsymbol{ST}$ = Superficie total.

TABLA VIII
ÁREA TOTAL DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ETANOL

Área	m^2
Área de producción	1014,58
Área de almacén de PT	156,35
Laboratorio de calidad	45,03
Oficina de producción	14,84
Oficina de calidad	14,84
Oficina de almacén	14,84
SS. HH Operarios	35,22
SS. HH Administrativos	9,00
ÁREA TOTAL ($\boldsymbol{m^2}$)	1 304,70

A continuación, se aplicó el método SLP con el fin de establecer la distribución óptima de la planta, obteniéndose el diseño final mostrado en la figura 5 y 6.

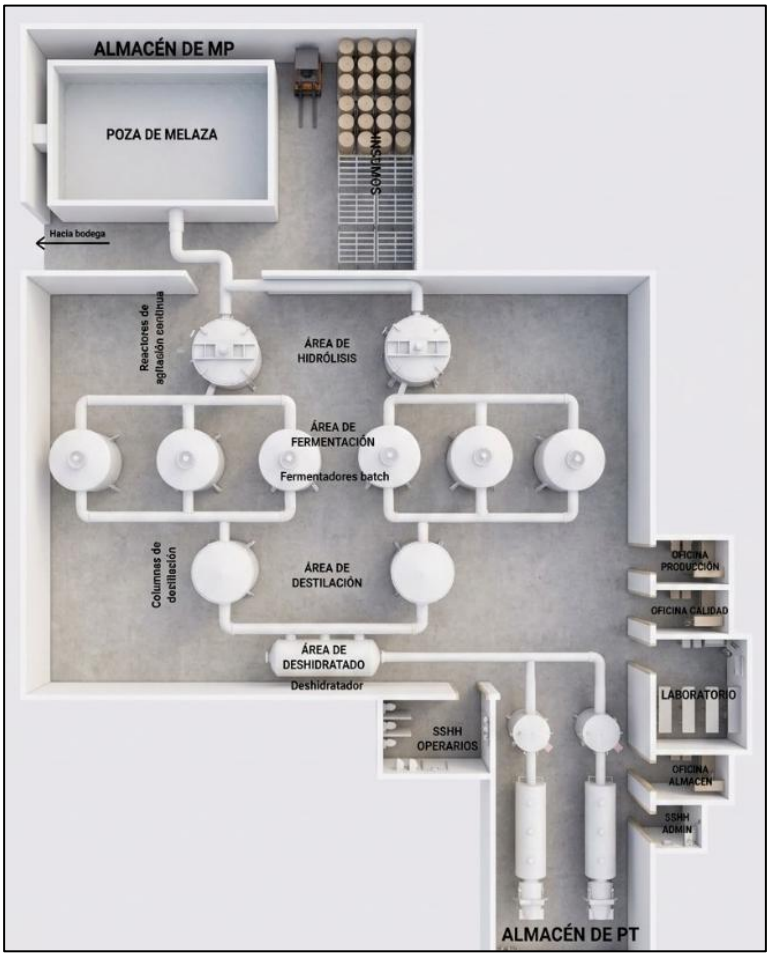


Fig. 5 Vista de planta 3D

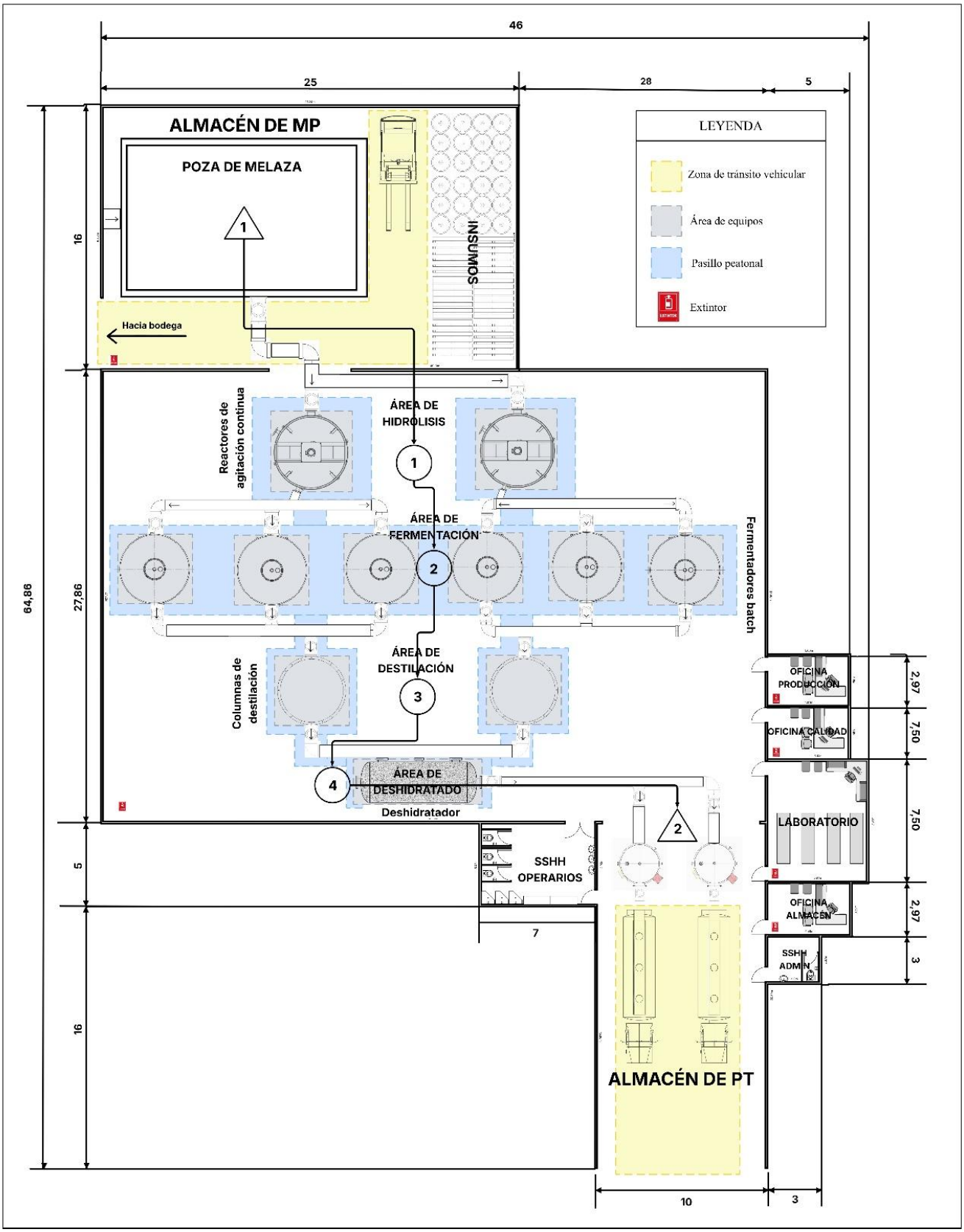


Fig. 6 Diseño de planta

Posteriormente, se evaluó la viabilidad económico – financiera del proyecto mediante la elaboración del flujo de caja y cálculo de los principales indicadores de rentabilidad, incluyendo el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI). Los resultados obtenidos se presentan en la TABLA IX.

TABLA IX
INDICADORES ECONÓMICOS

TIR	79%
VAN	S/ 24 956 940,65
TMAR	12,07%
PRI	1 años y 8 meses
B/C	1,15

Asimismo, con el fin de evaluar la sensibilidad y el nivel de riesgo del proyecto, se desarrolló un análisis basado en tres variables críticas: el precio de venta, el costo de los materiales directos de producción y la participación en el mercado. Para ello, se aplicaron porcentajes de variación respecto de los valores pronosticados, lo que permitió determinar el grado de tolerancia del proyecto frente a cambios en las condiciones de mercado. Lo dicho se puede apreciar en la TABLA X.

TABLA X
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Indicadores	Precio	Costo de materiales directos	Participación en el mercado
TMAR	12,07%	12,07%	12,07%
Variabilidad	14,84%	21,92%	16,00%
TIR	12,09%	12,08%	16,50%

Según lo observado, el precio de venta podría disminuir hasta en un 14,84% antes de que la TIR se sitúe por debajo de la TMAR, lo que haría que el proyecto pierda total rentabilidad. Asimismo, el costo de los materiales directos podría incrementarse hasta en un 21,92%, mientras que la participación de mercado podría reducirse en un 16%, antes de que estas variaciones comprometan la sostenibilidad económica de las operaciones.

Finalmente, se efectuó el análisis ambiental, mediante una matriz de Leopold, identificando y valorando los impactos del proyecto sobre los componentes del medio físico (agua superficial, aire y suelo) y del medio social.

En el medio físico, los componentes con mayor afectación fueron el agua superficial y el aire, cuyos aspectos de calidad, caudal y calidad del aire respectivamente registraron las valoraciones más elevadas, mientras que, en el medio social, fueron el territorio y los recursos naturales, seguido de la salud. Asimismo, las etapas del proyecto que generan mayor impacto fueron la hidrólisis enzimática, la fermentación y la destilación. Con base en estos resultados, se propusieron medidas de mitigación para reducir sus efectos sobre el entorno, las cuales se presentan en la TABLA XI.

TABLA XI
MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Actividad	Impacto ambiental	Medida de prevención y/o mitigación	Resultado esperado
Hidrólisis enzimática	Generación de efluentes con alta carga orgánica	Implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales en tres etapas: ecualización y separación, tratamiento anaerobio y pulido aeróbico.	- Reducción del consumo de agua fresca. - Remoción de hasta 99,6% de carga contaminante.
Fermentación	Generación de CO2 biogénico.	Instalar fermentadores cerrados con sistemas de captura y lavado de gases.	-Recuperación de hasta 0,45 kg de CO2/L etanol.
Destilación	Generación de vinaza con alta carga orgánica.	Implementar un sistema de aprovechamiento de vinaza para la producción de fertilizantes organominerales	- Disminución de efluentes.

Fuente: En base a [8].

V. DISCUSIONES

El estudio de mercado evidenció una demanda insatisfecha de etanol combustible a nivel nacional, lo que representa una oportunidad comercial para la empresa. Este resultado coincide con lo señalado por C. Harde y D. En Ojha [14], quienes destacan el potencial del etanol producido a partir de melaza como alternativa energética, resaltando sus ventajas económicas frente a otras materias primas, debido a su menor costo y disponibilidad como subproducto.

La propuesta estableció una temperatura de 34,5°C y un pH de 4,8, obteniéndose una concentración estimada de 9,9% v/v. Este resultado concuerda con lo reportado por S. Eseley e I. Byaruhanga, quienes evaluaron tres temperaturas de operación en la fermentación: 32°C, 34°C y 36°C, alcanzando la mayor concentración a 34°C [15]. Sin embargo, se difiere con la investigación de A. Wardani, quien empleó un pH de 5,5 junto con levadura seca instantánea, logrando una concentración máxima de 15,96% [16]. Esta diferencia sugiere que, además de la temperatura, el pH y el tipo de levadura constituyen variables determinantes en el rendimiento final del proceso.

El análisis económico – financiero demostró una alta rentabilidad del proyecto, con una TIR de 79% y un B/C de 1,15. Estos resultados son similares a los obtenidos por T. Méndez et al. quienes confirmaron la viabilidad económica de una biorrefinería a partir de melaza de caña. Obteniendo un B/C de 1,02 y una TIR de 35% [17]. En ambos casos se confirma el potencial económico de la propuesta, sin embargo, el presente trabajo presenta una rentabilidad superior debido a la menor inversión inicial, favorecida por el uso de terrenos e infraestructura ya disponibles en la empresa.

En cuanto al análisis ambiental se identificó a la hidrólisis, la fermentación y la destilación como las etapas de mayor impacto, para las cuales se plantearon medidas de mitigación. Estos resultados se complementan con lo reportado por Aranceles-Bastidas et al., quienes mediante un análisis de ciclo de vida (LCA) en un complejo azucarero de Ecuador, identificaron que la agricultura y la destilación concentran la

mayor carga ambiental, con 0,285 kg CO_2-eq y 0.369 kg CO_2-eq por litro de etanol respectivamente, resaltando la importancia de una gestión integral de toda la cadena productiva para reducir los impactos ambientales [18].

VI. CONCLUSIONES

En conclusión, la propuesta resultó ser plenamente viable en los aspectos comercial, técnico – tecnológico, económico – financiero y ambiental. Se identificó una demanda nacional insatisfecha de 13 311 600 galones en 2025, y una demanda para el proyecto de 4 896 543 galones hacia 2031, considerando una participación entre el 26% y 31%. Se determinó la disponibilidad de 41 344,62 toneladas de melaza para abastecer una producción de 64 359,17 litros diarios y con una eficiencia operativa de 83,93%. Se estimó un VAN de S/. 24 956 940,65, una TIR de 79%, superior a la TMAR de 12,07%, una relación B/C de 1,15 y un PRI de 1 año y 8 meses, lo que confirma una recuperación relativamente rápida del capital invertido. Asimismo, se identificaron los elementos más afectados y plantearon medidas de mitigación orientadas a reducir los impactos del proceso productivo.

VII. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo y a su personal docente por el apoyo institucional y la orientación brindada durante el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

[1] N. Aguilar-Rivera, D. A. Rodríguez L., V. Enríquez R., A. Castillo M., y A. Herrera S., «The Mexican Sugarcane Industry: Overview, Constraints, Current Status and Long-Term Trends», Sugar Tech, vol. 14, n.o 3, pp. 207-222, sep. 2012, doi: 10.1007/s12355-012-0151-3.

[2] Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria, «Consulta por partida». [En línea]. Disponible en: http://www.aduanet.gob.pe/cl-ad-itconsultadwh/ieITS01Alias?accion=consultar&CG_consulta=2

[3] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «El agro en cifras», Sistema Integrado de Estadística Agraria, Lima, Boletín estadístico mensual 1, abr. 2024.

[4] O. Osunkoya y N. Okwudinka, «Utilization of sugar refinery waste (molasses) for ethanol production- using Saccharomyces Cervicae», Am. J. Sci. Ind. Res., vol. 2, n.o 4, pp. 694-706, ago. 2011, doi: 10.5251/ajsir.2011.2.4.694.706.

[5] Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, «Incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)», Observatorio CEPLAN. Accedido: 24 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t62

[6] N. Slack, S. Chambers, y R. Johnston, Operations management, 6th ed. Harlow, England ; New York: Financial Times Prentice Hall, 2010.

[7] M. M. Marañón Granados, R. Murrieta Dueñas, J. Cortez Gonzáles, y M. A. Hernández Juárez, «Aplicación del Método Systematic Layout Planing (SLP) Para Mejorar La Distribución en Planta del Proceso de Producción de Transformadores», presentado en Congreso Internacional de Investigación e Innovación 2016, México, abr. 2016, p. 11.

[8] Ministerio del Ambiente - MINAM, «Guía para la identificación y caracterización de impactos ambientales en el marco del SEIA», Ministerio del Ambiente, Lima, Guía, ene. 2022. [En línea]. Disponible en: https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-identificacion-caracterizacion-impactos-ambientales-marco-seia

[9] R. Hernandez y C. Mendoza, Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. México: McGraw Hill.

[10] Ministerio de Energía y Minas, «Resolución Ministerial que establece especificaciones técnicas de calidad de Gasolinas y Gasohol de uso automotor, Premium y Regular». 24 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2024914-1

[11] Gaspar Nolte, «Biofuels Annual - Peru», Global Agricultural Information Network, Lima, Reporte PE2024-0016, dic. 2024.

[12] TradeMap, «Lista de importadores de etanol sin desnaturalizar con un grado alcohólico volumétrico igual o superior al 80% vol». TradeMap, 2024.

[13] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «Etanol», El Datero Agrario. Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.midagri.gob.pe/portal/datero/29-sector-agrario/azucar?utm_source=chatgpt.com

[14] C. K. Harde y D. K. Ojha, «Are ethanol-gasoline blends sustainable in India? A life cycle perspective on benefits and trade-offs», Sustain. Chem. Clim. Action, vol. 7, p. 100128, dic. 2025, doi: 10.1016/j.scca.2025.100128.

[15] Department of Physical Sciences, School of Natural and Applied Science, Kampala International University, Uganda, E. Stephen, B. Ivan, y Department of Physical Sciences, School of Natural and Applied Science, Kampala International University, Uganda, «Evaluation of the Impact of Temperature on Ethanol Production from Molasses using Saccharomyces cerevisiae to Determine the Optimal Temperature for Maximum Yield», INOSR Appl. Sci., vol. 12, n.o 2, pp. 33-42, jul. 2024, doi: 10.59298/INOSRAS/2024/12.2.334200.

[16] A. K. Wardani, C. P. Utami, M. B. Hermanto, A. Sutrisno, y F. Nurtyastuti, «Bioethanol Production from Sugarcane Molasses by Fed-Batch Fermentation Systems Using Instant Dry Yeast», Microbiol. Biotechnol. Lett., vol. 51, n.o 2, pp. 184-190, jun. 2023, doi: 10.48022/mbl.2301.01012.

[17] A. J. Castro-Montoya, T. Méndez-Romero, A. A. Vargas-Tah, N. Aguilar-Rivera, y P. E. Lazato-Mixteco, «Sugarcane molasses-based biorefinery: Organic acids and ethanol production», Renew. Energy Biomass Sustain., vol. 5, n.o 1, pp. 1-9, feb. 2023, doi: 10.56845/rebs.v5i1.78.

[18] D. Arcentales-Bastidas, C. Silva, y A. Ramirez, «The Environmental Profile of Ethanol Derived from Sugarcane in Ecuador: A Life Cycle Assessment Including the Effect of Cogeneration of Electricity in a Sugar Industrial Complex», Energies, vol. 15, n.o 15, p. 5421, jul. 2022, doi: 10.3390/en15155421.