

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**TESINA QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA**

Valorización integrada de residuos agroindustriales: extracción de aceites esenciales y producción de bioetanol a partir de cáscara de naranja, hojas de eucalipto y bagazo cervecero.

Presenta:

Jesús Manuel Armenta Gálvez

Director de tesis:

Dr. José Ramón Ayala Bautista

Codirector de tesis:

Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega

Mexicali Baja California

Noviembre del 2025

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de doctorado.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California por haberme recibido y brindado el espacio académico para el desarrollo de la presente investigación. Reconozco también a los docentes que con sus enseñanzas contribuyeron de manera significativa a mi formación científica y profesional.

En especial, a mis directores de tesis, el Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega y el Dr. José Ramón Ayala Bautista, por su invaluable guía, paciencia y calidad humana, cualidades que fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Sus orientaciones y consejos siempre claros y oportunos marcaron la diferencia en mi trayectoria doctoral, y su apoyo constante permanecerá conmigo con profundo agradecimiento.

Extiendo un agradecimiento especial al Dr. A. Gabriel Ayala Bautista, cuyas enseñanzas despertaron en mí un mayor interés por la investigación, motivándome a seguir el camino de la ciencia con pasión y disciplina.

En el ámbito personal, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi hermano, cuyo apoyo, compañía y confianza fueron una fuente constante de fortaleza durante este proceso. A mis padres, por su amor, paciencia y respaldo incondicional, pilares fundamentales para alcanzar esta meta. Asimismo, recuerdo con especial cariño, gratitud y amor a mi abuelo Manuel Gálvez Rojas, ejemplo de trabajo y perseverancia, cuyo legado ha sido inspiración en cada paso de mi formación académica, al cual le dedico mi grado de Doctor.

Finalmente, agradezco a mis compañeros de generación y colegas de investigación, en particular a Alba, Adriana, Andrea, Laura, Álvaro y Michelle, por su colaboración, apoyo y amistad que hicieron más enriquecedor este trayecto.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de los compuestos más representativos en OPEO (A) y ELEO (B).

Figura 2. Proceso de producción de bioetanol a partir de bagazo cervecero y cáscara de naranja mediante hidrólisis, fermentación y destilación.

Figura 3. Esquema de la fermentación alcohólica en *S. cerevisiae*, donde la glucosa se transforma en etanol y CO₂ a través de la glucólisis y la descarboxilación del piruvato.

Figura 4. Proceso de extracción de aceites esenciales de cáscara de naranja y hojas de eucalipto.

Figura 5. Bagazo cervecero (BSG) y cáscara de naranja (OP) utilizados como materias primas, acondicionados y preparados para su hidrólisis ácida bajo condiciones controladas.

Figura 6. Preparación y análisis de hidrolizados de BSG y OP bajo distintas condiciones de hidrólisis ácida y medición de pH previa a la fermentación.

Figura 7. Cuantificación de azúcares reductores por DNS mediante espectrofotometría UV-Vis, utilizando el equipo UV-3100PC y las muestras de hidrolizados para determinar las concentraciones de glucosa y xilosa.

Figura 8. Incubadora empleada en la fermentación alcohólica para mantener condiciones controladas de temperatura y agitación durante la producción de bioetanol.

Figura 9. Esquema del proceso de producción de bioetanol a partir de OP y BSG: hidrólisis, filtración, fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* y destilación.

Figura 10. Superficie de respuesta para el proceso de extracción de OPEO.

Figura 11. Superficie de respuesta para el proceso de extracción de ELEO.

Figura 12. Superficie de respuesta para las columnas de destilación: (a) para OPEO, (b) para ELEO.

Figura 13. Índice total de energía (TEI) para el proceso de extracción: (a) OPEO, (b) ELEO.

Figura 14. Perfil de temperatura del agua a la salida del colector solar y radiación en diferentes días del año: (a) 30 de enero, (b) 10 de mayo, (c) 27 de agosto, (d) 5 de diciembre.

Figura 15. Comparación del TEI del proceso de extracción de aceites esenciales con integración de energía solar.

Figura 16. Superficies de respuesta de la concentración de ácido sulfúrico (% v/v) y la temperatura (°C) sobre la liberación de glucosa (A, C) y xilosa (B, D) durante la hidrólisis de cáscara de naranja (OP) a 1 h (A, B) y 2 h (C, D).

Figura 17. Análisis de residuos (A, C) y gráficos de probabilidad normal (B, D) de los modelos ajustados para glucosa y xilosa obtenidas de hidrolizados de cáscara de naranja (OP).

Figura 18. Superficie de respuesta aplicada a la cáscara de naranja (OP) en función de la concentración de ácido (% v/v) y la temperatura (°C): (a) concentración de glucosa (g/L), (b) concentración de xilosa (g/L).

Figura 19. Análisis de residuos (A, C) y gráficos de probabilidad normal (B, D) de los modelos ajustados para las concentraciones de glucosa y xilosa obtenidas a partir de hidrolizados de bagazo cervecero (BSG).

Figura 20. Comparación entre los valores experimentales y predichos de glucosa y xilosa obtenidos a partir de la hidrólisis de OP (A) y BSG (B), utilizando modelos de superficie de respuesta.

Figura 21. Producción de bioetanol a partir de OP (A) y BSG (B) a diferentes temperaturas.

Figura 22. Producción y demanda de bioetanol en México en comparación con el potencial de los residuos agroindustriales.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química típica de OP y BSG, con indicación de base seca (BS) o base húmeda (BH).

Tabla 2. Modelos de equivalencia utilizados en la simulación

Tabla 3. Resultados de la concentración de glucosa y xilosa para OP (D.E. desviación estándar).

Tabla 4. Análisis de varianza para la concentración de glucosa y xilosa en OP.

Tabla 5. Resultados de concentración de glucosa y xilosa para BSG (D.E., desviación estándar).

Tabla 6. Análisis de varianza para la concentración de glucosa y xilosa en BSG (bagazo cervecero).

Tabla 7. Análisis comparativo de la producción de glucosa y xilosa a partir de OP y BSG.

Abstract

The orange juice and wood production industries generate large volumes of orange peel and eucalyptus leaves. These residues can be valorized through the extraction of essential oils, a process that in this study was simulated by integrating solar energy, achieving a 10% reduction in total energy demand. However, the extraction of orange essential oil leaves behind a byproduct rich in fermentable sugars, opening the possibility for additional valorization aimed at biofuels. With this biorefinery perspective, bioethanol production from orange peel (OP) and brewer's spent grain (BSG) was evaluated through acid hydrolysis and fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. Under optimal conditions (125 °C, 0.5% H₂SO₄ for OP and 160 °C, 2.5% H₂SO₄ for BSG), up to 52.14 g/L of glucose and 15.70 g/L of xylose were released from OP, and 27.10 g/L of glucose and 14.22 g/L of xylose from BSG. Fermentation reached yields of 5.25% v/v in OP and 1.5% v/v in BSG, with highly predictive kinetic models ($R^2 > 0.98$). Overall, these results show that the integration of essential oil extraction processes and fermentation of sugar-rich residues represents a strategy to maximize the value of agro-industrial biomass.

RESUMEN

La industria de jugo de naranja y la producción de madera generan grandes volúmenes de cáscara de naranja (OP) y hojas de eucalipto. Estos residuos pueden ser valorizados mediante la extracción de aceites esenciales, proceso que en este estudio se simuló integrando energía solar, logrando un ahorro del 10 % en la carga energética total. Sin embargo, la obtención de aceite esencial de naranja deja como subproducto una fracción rica en azúcares fermentables, lo que abre la posibilidad de un aprovechamiento adicional orientado a biocombustibles. Con esta visión de biorrefinería, se evaluó la producción de bioetanol a partir de cáscara de naranja (OP) y bagazo cervecero (BSG) mediante hidrólisis ácida y fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*. Bajo condiciones óptimas (125 °C, 0.5 % H₂SO₄ para OP y 160 °C, 2.5 % H₂SO₄ para BSG), se liberaron hasta 52.14 g/L de glucosa y 15.70 g/L de xilosa en OP, y 27.10 g/L de glucosa y 14.22 g/L de xilosa en BSG. La fermentación alcanzó rendimientos de bioetanol de 5.25 % v/v en OP y 1.5 % v/v en BSG, con modelos cinéticos altamente predictivos ($R^2 > 0.98$). En conjunto, estos resultados muestran que la integración de procesos de extracción de aceites esenciales y fermentación de residuos azucarados representa una estrategia para maximizar el valor de la biomasa agroindustrial.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aceites esenciales: marco general y casos de estudio de cáscara de naranja y hojas de eucalipto

Los aceites esenciales (EOs) son sustancias aromáticas presentes en prácticamente todas las plantas. Se distribuyen ampliamente en diferentes partes como raíces, tallos, hojas, flores y frutos. Los EOs son una mezcla de terpenos, sesquiterpenos, ácidos, ésteres, fenoles y lactonas. Sus aplicaciones han sido investigadas para la preservación de alimentos, saborizantes, control de plagas y efectos antimicrobianos, entre otros [1,2].

El limoneno es el principal constituyente del aceite esencial de cáscara de naranja (OPEO). Es un terpeno responsable del olor característico del limón y la naranja. Algunas aplicaciones del limoneno son pigmentos, tintas, adhesivos, solventes en resinas, etc. La composición de OPEO varía según la región y el método de extracción. El contenido de limoneno en OPEO varía entre 85–95 % en peso [3].

El aceite esencial de hojas de eucalipto (ELEO) se utiliza como medicina natural en tratamientos terapéuticos contra enfermedades respiratorias y en productos de higiene personal, debido a sus propiedades antisépticas, bactericidas, insecticidas y de fumigación [4,5]. En el ELEO, el terpeno con mayor contribución es el 1,8-cineol, cuya concentración puede oscilar entre 35 y 45 % en peso. Los componentes más representativos de OPEO (A) y ELEO (B) se muestran en la Figura 1.

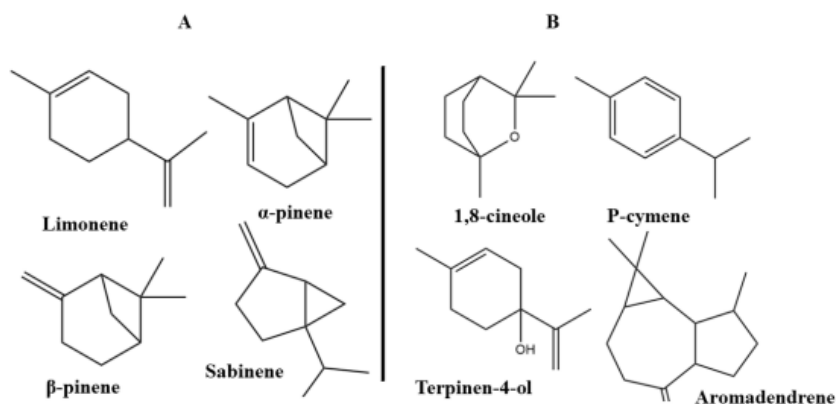


Figura 1. Estructura química de los compuestos más representativos en OPEO (A) y ELEO (B).

1.2 Métodos de extracción de aceites esenciales, simulación de procesos (ASPEN PLUS®/TRNSYS®) e integración con energía solar

El método de extracción determina la posible aplicación y la composición final del EO. Los métodos utilizados para la extracción de AE incluyen hidrodestilación, destilación por arrastre de vapor, destilación al vacío, extracción con solventes, prensado en frío, extracción con fluidos supercríticos, microondas y ultrasonido [6-9]. Cualquier factor que mejore la difusividad y la solubilidad en los métodos facilitará la extracción. Las propiedades del solvente, el tamaño de partícula de la materia prima, la relación solvente:sólido, la temperatura y el tiempo de extracción afectarán la eficiencia de la extracción [10]. Dado el elevado número de variables de operación y su interacción en estos procesos de extracción, se requieren herramientas de modelado y simulación que permitan evaluar y optimizar su desempeño.

La simulación de procesos industriales es una herramienta que permite estudiar el comportamiento de un proceso, analizar la influencia de diferentes variables y diseñar equipos, procesos y plantas sin el alto costo de los experimentos a escala industrial. De esta manera, es posible optimizar procesos y detectar oportunidades de ahorro energético [11].

ASPEN PLUS® se basa en una simulación de diagrama de flujo. Está representado por diferentes íconos, donde cada uno equivale a una operación unitaria. Algunas de las operaciones incluidas en el software son mezcla, separación, absorción, destilación, extracción, calentamiento/enfriamiento con o sin cambio de fase, y transformación química [12]. En los últimos años, el software TRNSYS® se ha utilizado para la modelación de tecnologías solares, lo que permite el diseño, la optimización y el análisis

detallado de cualquier sistema cuyo comportamiento dependa del tiempo. Se aplica para validar nuevos desarrollos energéticos, incluidas estrategias de control y sistemas de energía renovable [13].

La extracción que utiliza energía solar es relativamente nueva en el sector. Por ejemplo, Munir et al. [14] desarrollaron una destilería solar basada en reflectores Scheffler para extraer aceites esenciales de menta, romero y comino. Según un análisis de patentes entre 2010–2019, existe una patente registrada en India [15] que utiliza energía solar térmica para suministrar vapor a un proceso específico de extracción de aceites esenciales. Los aceites esenciales tienen diversas aplicaciones; sin embargo, hay pocas publicaciones en la literatura en las que se simulen procesos de extracción a gran escala. Además, la integración de energía solar es un elemento novedoso que favorece la eficiencia energética en el diseño de procesos.

1.3 Valorización de cáscara de naranja y bagazo cervecero en biorrefinería y papel estratégico del bioetanol ante el cambio climático

La valorización de la cáscara de naranja (OP) ha demostrado potencial tanto para la obtención de aceites esenciales, en particular limoneno, como para la producción de bioetanol a partir de sus azúcares fermentables. En este contexto, se integraron ambos enfoques dentro de un esquema de biorrefinería, donde los aceites esenciales se extraen con apoyo de energía solar y los residuos resultantes se destinan a la fermentación alcohólica. Asimismo, para ampliar el alcance del estudio y considerando la disponibilidad local de biomasa en Mexicali, Baja California, México, incluyó otro residuo agroindustrial de gran generación en la región: el bagazo cervecero (BSG). De esta manera, la investigación combina dos corrientes de residuos con alto potencial energético y de valor agregado.

En el contexto del cambio climático y el agotamiento de los recursos fósiles, las fuentes de energía renovables, como la biomasa, representan alternativas clave para la generación de energía. El bioetanol se produce mediante la fermentación de residuos agrícolas, forestales y de cultivos energéticos, ofreciendo una vía para diversificar las fuentes energéticas y reducir la generación de desechos [16-17]. Su uso en motores de combustión interna puede disminuir hasta en un 52 % las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con la gasolina [18].

A lo largo del último siglo, las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) originadas en la quema de combustibles fósiles y actividades industriales han experimentado una tendencia sostenida al alza, pasando de menos de 5 gigatoneladas (Gt) en la década de 1950 a niveles superiores a 36 Gt en años recientes, según datos históricos reconstruidos por fuentes como Friedlingstein et al. (2022) [19]. Ante esta realidad, la Agencia Internacional de Energía (IEA) proyecta que la demanda mundial de biocombustibles, incluyendo bioetanol y biodiésel, crecerá de aproximadamente 160 mil millones de litros en 2022 a cerca de 200 mil millones de litros en 2028. Este incremento será impulsado principalmente por el bioetanol, debido a su competitividad técnica, su

menor huella ambiental y el respaldo de políticas públicas en países emergentes y economías desarrolladas [20]. En este contexto, el bioetanol emerge como un componente clave en la matriz energética global [21].

1.4 Bioetanol como insumo químico estratégico y eje de economía circular y simbiosis industrial a partir de OP y BSG

Además, el bioetanol es un insumo químico de alta demanda en el sector salud, como se evidenció durante la pandemia de COVID-19 [22]. Con el continuo avance tecnológico y el respaldo gubernamental, el bioetanol podría desempeñar un papel fundamental en la transición hacia una energía más limpia.

El aprovechamiento de OP y BSG para la producción de bioetanol es un ejemplo representativo de economía circular aplicada, ya que transforma subproductos con potencial contaminante en un biocombustible renovable, reduce emisiones de gases de efecto invernadero y promueve la seguridad energética [23-24]. Además, la adopción de estos procesos favorece la simbiosis industrial, donde los residuos de una empresa se convierten en recursos para otra, fortaleciendo las cadenas de valor regionales [25-26].

1.5 Disponibilidad, composición y huella ambiental de OP y BSG desde la escala global hasta México

En 2024, la producción mundial de naranja alcanzó los 48.8 millones de toneladas, siendo Brasil el principal productor con 16.5 millones de toneladas. México produjo 4.8 millones de toneladas, posicionándose como uno de los principales países productores junto con China, Estados Unidos de América y España [27-28]. La elaboración de jugo de naranja genera una gran cantidad de residuo conocido como pulpa o bagazo de naranja, que está compuesto en un 50 % por cáscara, albedo y semillas [23].

La cáscara de naranja (OP) es rica en compuestos bioactivos como aceites esenciales, polifenoles, fibras y azúcares, lo que la hace valiosa para aplicaciones industriales y nutracéuticas [28]. Estos azúcares incluyen glucosa, fructosa y sacarosa, además de polisacáridos estructurales como celulosa, hemicelulosa y pectina como se muestra en la Figura 1.

Por otro lado, el bagazo cervecero (BSG) es un subproducto de la industria cervecera, cuya producción mundial alcanzó en 2023 los 1.88 mil millones de hectolitros, generando aproximadamente 36.4 millones de toneladas de BSG [20]. México se posiciona como uno de los mayores productores de este subproducto, con 124 millones de hectolitros de cerveza, que en 2019 generaron 2.48 millones de toneladas de BSG [29]. Este residuo contiene celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas y compuestos fenólicos [30], y se ha empleado en la elaboración de fertilizantes orgánicos, bioetanol, xilitol, biogás, bioplásticos y enzimas mediante procesos fermentativos, promoviendo así la economía circular y la sustentabilidad.

La OP es un residuo lignocelulósico rico en celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina, además de compuestos aromáticos como el limoneno. Su composición varía dependiendo del origen, la temporada de cosecha y el tratamiento industrial previo, como la extracción de aceites esenciales. Melo et al. reportaron contenidos de 69.10 % de celulosa, 9.02 % de hemicelulosa, 19.80 % de lignina y 0.05 % de ceniza en base seca, con una humedad de 73.53 % [11]. Otros estudios han encontrado valores mucho menores en celulosa (12.7–13.6 %), hemicelulosa (5.3–6.1 %) y lignina (≤ 2 %), lo que refleja la variabilidad por factores genéticos y ambientales como se muestra en la Tabla 1 [31]. Además, se ha documentado la presencia de pectinas con alto contenido de ácido galacturónico y EOs que pueden ser extraídos antes de la conversión a azúcares fermentables [32].

Por su parte, el BSG está compuesto principalmente por restos de la cáscara de cebada y fracciones del pericarpio y la testa del grano, siendo rico en polisacáridos estructurales y proteínas. Mussatto et al. reportaron un 17 % de celulosa, 28 % de polisacáridos no celulósicos (principalmente arabinosilanos) y 28 % de lignina [12]. Otros análisis han mostrado contenidos de proteína cruda de 20–30 %, hemicelulosa de 29.96 %, celulosa de 13.14 %, lignina de 7.12 %, además de minerales como calcio (~1,038 ppm), magnesio (~687 ppm), fósforo (~1,977 ppm) y silicio (~242 ppm) [33].

Comentado [JA1]: Qué figura?

Tabla 1. Composición química típica de OP y BSG, con indicación de base seca (BS) o base húmeda (BH).

Biomass	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignin (%)	Protein (%)	Lipids (%)	Ash/ Minerals	Calculation basis	Reference
OP	69.10	9.02	19.80	–	–	0.05	BS	Melo et al., 2021
OP	12.7–13.6	5.3–6.1	≤ 2	–	–	–	BH	Reddy & Yang, 2005
OP	17.40	10.55	7.33	6.02	2.12	3.20	BS	Bai et al., 2008
OP	18.20	11.00	6.90	7.10	2.00	3.80	BS	Gomes et al., 2018
BSG	17.00	~28	28.00	–	–	–	BS	Mussatto et al., 2006
BSG	13.14	29.96	7.12	20–30	~10	Ca, Mg, P, Si (ppm)	BS	Sganzerla et al., 2021
BSG	18.50	26.80	8.50	22.10	9.80	3.00	BS	Paz et al., 2019

BSG	16.80	27.40	8.10	21.50	9.50	2.80	BS	Xavier et al., 2022
------------	-------	-------	------	-------	------	------	----	------------------------

En la Tabla 1 la OP muestra diferencias marcadas de composición porque los estudios no siempre reportan en la misma base (seca vs. húmeda) y, además, difieren en el pretratamiento aplicado antes del análisis. Por ejemplo, cuando la muestra se seca y se extraen solubles (aceites esenciales, azúcares libres, pectinas fácilmente extraíbles), el fraccionamiento lignocelulósico relativo (especialmente la celulosa) tiende a verse “enriquecido”, generando valores altos como los de Melo et al. (69.10 % de celulosa en BS) [11].

En cambio, cuando se trabaja con material BH o con mínima preparación, el alto contenido de humedad y solubles “diluye” el porcentaje de celulosa y hemicelulosa, como en Reddy & Yang (BH) [31]. Además, los cítricos presentan variación genética y estacional (madurez, cultivar, prácticas postcosecha) y la extracción previa de limoneno y pectinas modifica fuertemente la fracción estructural residual, lo cual también explica discrepancias entre estudios [32].

Aunque Bai et al. [34] y Gomes et al. [35] se enfocan en bioetanol y control de procesos, sus hallazgos dejan algo clave: para comparar datos y predecir rendimientos con sentido, hay que estandarizar la base de reporte seca o húmeda y los pretratamientos como si antes se secó la muestra o se extrajeron aceites y azúcares. Sin esa uniformidad, las comparaciones salen sesgadas.

Para el BSG, la variabilidad es inherente a su naturaleza como subproducto de proceso: el tipo de cebada y malta, la presencia de adjuntos como maíz y arroz, las temperaturas y tiempos de maceración. El régimen enzimático determina cuánto almidón y solubles se extraen al mosto y, por tanto, qué queda en el BSG. Por ello, los rangos de proteína (20–30%) y de fibra estructural (celulosa, arabinosilanos/hemicelulosa y lignina) varían de forma consistente entre autores. Mussatto et al. caracterizan un BSG rico en fibra (e.g. 17 % celulosa; 28 % polisacáridos no celulósicos; 28 % lignina) en BS [12], mientras que estudios de proceso orientados a la valorización como Paz et al. (hidrólisis enzimática) [36] y Xavier et al. (agua subcrítica como pretratamiento) [37] reportan composiciones y liberación de azúcares que dependen de las condiciones de hidrólisis y del pretratamiento aplicado, lo que hace esperables diferencias entre tablas aún bajo BS. Evaluaciones tecnoeconómicas, como Sganzerla et al. [33], subrayan que estas variaciones composicionales impactan la selección de rutas de revalorización (etanol, biogás, fertilizantes), pues proteína, fibra y minerales cambian los balances de masa y energía.

El manejo inadecuado de OP y BSG puede generar impactos ambientales significativos, tales como emisión de metano en rellenos sanitarios y contaminación de cuerpos de agua debido al escurrimiento de lixiviados ricos en materia orgánica, lo cual contribuye a

procesos de eutrofización y afecta negativamente la biodiversidad [38-39]. Asimismo, estos residuos ocupan espacio en vertederos, incrementando la demanda de nuevos sitios de disposición final. Por ello, su aprovechamiento y valorización son fundamentales para mitigar estos impactos y generar beneficios económicos [9].

Por cada litro de cerveza producida se generan aproximadamente 600 g de este subproducto, lo que representa alrededor del 85 % de los residuos sólidos de la industria cervecera [40]. Cuando el BSG se dispone en rellenos sanitarios o se abandona en espacios abiertos, su alto contenido de materia orgánica favorece la descomposición anaerobia y la consiguiente liberación de metano (CH_4), un gas de efecto invernadero cuyo potencial de calentamiento global es 25 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2) [38]. A esto se suma la generación de aguas residuales ricas en sólidos suspendidos y materia orgánica proveniente de restos de malta y levadura, las cuales, si no reciben un tratamiento adecuado, pueden contaminar cuerpos de agua superficiales y subterráneos, ocasionando alteraciones en la calidad del agua y afectando la biodiversidad acuática [39]

Por su parte, la OP, residuo principal de la industria procesadora de jugo, se genera en grandes volúmenes y, pese a contener compuestos de alto valor industrial como aceites esenciales, polifenoles y fibra dietética, con frecuencia es desechada sin tratamiento ni aprovechamiento [39]. Su acumulación en tiraderos o en campo abierto implica un riesgo ambiental debido a su elevada carga orgánica, que puede provocar lixiviados con alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y contribuir a la contaminación de suelos y cuerpos de agua. En condiciones inadecuadas de disposición, la degradación de la biomasa también libera gases de efecto invernadero y genera olores desagradables, agravando el impacto ambiental en las zonas cercanas a los centros de producción.

Estos antecedentes evidencian que la disposición no controlada de BSG y OP no solo representa una pérdida de materiales con potencial de valorización, sino que además genera problemas ambientales que justifican la búsqueda de estrategias sostenibles para su gestión [2]. En este contexto, la conversión de estos residuos en bioetanol surge como una alternativa viable para reducir su impacto ambiental, aprovechando su contenido de carbohidratos fermentables y contribuyendo a la transición hacia un modelo de economía circular [13].

En 2023, México produjo 157.4 millones de litros de etanol, mientras que se importaron 307 millones de litros para cubrir el déficit nacional [27]. Esta situación evidencia la necesidad de incrementar la producción nacional de etanol, con el fin de reducir la dependencia de las importaciones y fortalecer la autosuficiencia energética del país [28].

1.6 Conversión de biomasa lignocelulósica a bioetanol mediante distintos tipos de hidrólisis, pretratamientos, fermentación y selección de microorganismos

El bioetanol se obtiene mediante un proceso que incluye pretratamiento, hidrólisis y fermentación. El pretratamiento comprende métodos físicos, químicos y biológicos, esenciales para romper la estructura compleja de la biomasa como se muestra en la

Figura 2. Los métodos físicos incluyen normalmente molido y extrusión, los métodos químicos implican el uso de ácidos o álcalis, y el pretratamiento biológico utiliza enzimas o microorganismos capaces de degradar la lignina y la celulosa [41].

En las últimas dos décadas, la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica ha pasado de ser un campo experimental para convertirse en un área prioritaria de investigación aplicada e innovación industrial. Este avance ha sido impulsado por la necesidad de encontrar alternativas energéticas que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero, diversifiquen la matriz energética y promuevan la valorización de residuos agroindustriales, como los que se ejemplifican en la Figura 2.

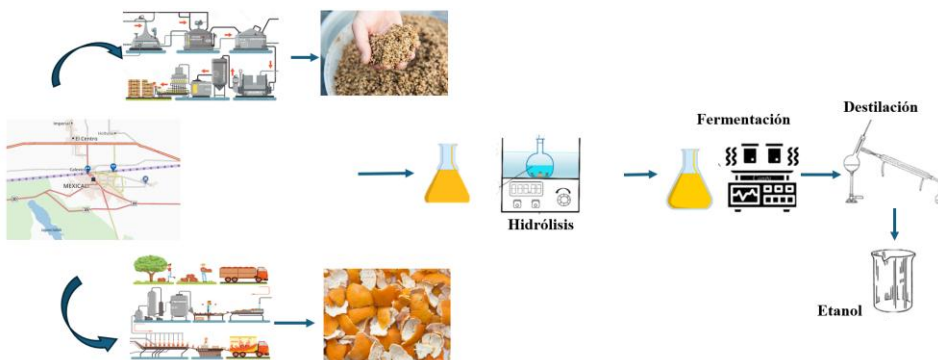


Figura 2. Proceso de producción de bioetanol a partir de bagazo cervicero y cáscara de naranja mediante hidrólisis, fermentación y destilación

La hidrólisis enzimática es un proceso catalizado por enzimas hidrolíticas especializadas (celulasas, hemicelulasas, β -glucosidasas, xilanasas, mananasas, entre otras) que degrada los polisacáridos estructurales presentes en la biomasa lignocelulósica, liberando azúcares fermentables como glucosa, xilosa y arabinosa [42-45].

Este enfoque presenta ventajas significativas frente a la hidrólisis ácida:

- Opera bajo condiciones suaves de temperatura (40–55 °C) y pH moderado (4.5–5.5), reduciendo la corrosión y el desgaste de los equipos [42].
- Minimiza la formación de subproductos inhibidores como furfural, hidroximetilfurfural (HMF) o ácido acético, lo que mejora la eficiencia fermentativa posterior[44].
- Permite mayor selectividad hacia los azúcares objetivo, con una menor degradación de estos.

El mecanismo involucra la acción sinérgica de diferentes clases de enzimas:

1. Endoglucanas que rompen enlaces internos de la celulosa amorfa, generando puntos de ataque.
2. Exoglucanas o celobiohidrolasas que actúan sobre los extremos de la cadena, liberando celobiosa.
3. β -glucosidasas que hidrolizan la celobiosa en glucosa monomérica.
4. En el caso de hemicelulosa, xilanasas y arabinofuranosidasas degradan xilanos y arabinanos, liberando xilosa y arabinosa.

Los principales retos de la hidrólisis enzimática son el alto costo de las enzimas comerciales, la posible desnaturalización en condiciones de operación prolongadas y la necesidad de dosis enzimáticas relativamente elevadas para lograr conversiones completas. Para superar estas barreras, se han propuesto estrategias como:

- Producción *in situ* de enzimas por microorganismos lignocelulolíticos durante la fermentación.
- Inmovilización enzimática sobre soportes sólidos para su reutilización en múltiples ciclos.
- Uso de cócteles enzimáticos personalizados según la composición química del sustrato (por ejemplo, mezclas específicas para bagazo cervecero vs. cáscara de naranja).
- Pretratamientos combinados (químico/enzimático) que reducen la recalcitrancia y mejoran la accesibilidad a los polisacáridos.

Estudios recientes han mostrado que integrar hidrólisis enzimática con fermentación simultánea (SSF, Simultaneous Saccharification and Fermentation) puede incrementar la conversión global, ya que la glucosa liberada es consumida inmediatamente por los microorganismos, reduciendo la inhibición por acumulación [46].

El pretratamiento es la etapa destinada a romper la estructura compacta y recalcitrante de la lignocelulosa para facilitar la acción hidrolítica posterior. La matriz vegetal está compuesta por una red de celulosa cristalina embebida en hemicelulosa amorfa y lignina poliaromática, lo que dificulta el acceso enzimático [42-43]

Tradicionalmente se han empleado métodos con ácidos minerales concentrados (H_2SO_4 , HCl) o álcalis fuertes (NaOH, $Ca(OH)_2$), que, aunque efectivos, generan efluentes de alta carga contaminante y aceleran la corrosión de los equipos [43]. En respuesta, han emergido pretratamientos verdes, que utilizan condiciones más sostenibles y con menor impacto ambiental. Entre ellos destacan:

1. Explosión con vapor (steam explosion): somete la biomasa a vapor presurizado (160–240 °C) seguido de una descompresión súbita, lo que rompe las fibras y aumenta la superficie específica.

2. Líquidos iónicos (ILs) reciclables: solventes no volátiles que disuelven lignina y hemicelulosa sin degradar la celulosa, permitiendo su recuperación para múltiples ciclos.
3. Agua subcrítica: operando entre 100 y 374 °C bajo presión, el agua cambia sus propiedades de disolvente y promueve la hidrólisis parcial de polisacáridos y la extracción de compuestos fenólicos.
4. Ultrasonido de alta intensidad: genera cavitación acústica que rompe las paredes celulares y mejora la penetración de enzimas.
5. Microondas: inducen calentamiento rápido y uniforme, debilitando enlaces y favoreciendo la apertura de la estructura lignocelulósica.

Estos métodos permiten reducir el uso de reactivos peligrosos, optimizar el balance energético del proceso y minimizar la generación de subproductos no deseados. Adicionalmente, son más compatibles con la producción de bioetanol en un marco de economía circular, ya que facilitan el aprovechamiento integral de la biomasa (azúcares, lignina y compuestos bioactivos) [43-44].

La fermentación es el corazón del proceso, donde los azúcares se transforman en etanol y CO₂ mediante microorganismos fermentadores. Tradicionalmente, la fermentación discontinua (batch) ha sido el método preferido por su sencillez: se cargan el sustrato y el inóculo, se deja fermentar hasta agotar los azúcares y luego se descarga el producto. Sus ventajas son el bajo costo de instalación, facilidad de operación y versatilidad para distintos sustratos. Sin embargo, presenta productividades volumétricas menores, debido a los tiempos muertos entre ciclos y a que la concentración de etanol puede llegar a inhibir el metabolismo microbiano [47-48].

En contraste, la fermentación continua alimenta el reactor con sustrato fresco y retira producto de manera constante, manteniendo a las células en fase exponencial, lo que maximiza la tasa de conversión. Este método ofrece mayor productividad y uso más eficiente del equipo, pero requiere sistemas de control y monitoreo avanzados (sensores de pH, temperatura, oxígeno disuelto, densidad celular) y presenta mayor riesgo de contaminación debido a la operación prolongada [46].

Entre las innovaciones más prometedoras se encuentra la fermentación continua acoplada a separación *in situ* del etanol, mediante pervaporación, destilación extractiva o membranas selectivas. Esto evita que el etanol alcance niveles inhibitorios, prolonga la viabilidad celular y permite lograr altas concentraciones de producto sin interrumpir el proceso [47].

Otras tendencias incluyen la fermentación en co-cultivo (uso de dos o más microorganismos para fermentar hexosas y pentosas simultáneamente) [49-50], la fermentación en estado sólido (SSF) para sustratos de baja humedad [46] y la fermentación integrada con pretratamiento para reducir costos y tiempo de proceso [43-44].

La temperatura óptima resulta crítica para la actividad enzimática, mientras que un pH inadecuado puede comprometer la viabilidad celular. Bajo condiciones anaerobias, la presencia de oxígeno disminuye la eficiencia al favorecer la respiración aerobia. Asimismo, compuestos como el ácido acético y el furfural pueden inhibir el crecimiento microbiano y afectar negativamente la producción de etanol [51-52].

Saccharomyces cerevisiae presenta una alta eficiencia en la fermentación de glucosa hacia etanol, mientras que *Zymomonas mobilis* muestra una elevada tolerancia al etanol y la capacidad de fermentar tanto glucosa como fructosa [48]. Por su parte, cepas modificadas de *Escherichia coli* pueden fermentar xilosa y arabinosa, componentes clave de la hemicelulosa como se muestra en la Figura 3 [52].

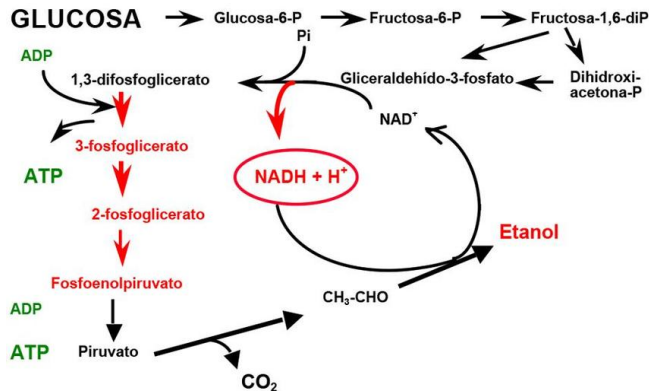


Figura 3. Esquema de la fermentación alcohólica en *S. cerevisiae*, donde la glucosa se transforma en etanol y CO_2 a través de la glucólisis y la descarboxilación del piruvato.

El rendimiento teórico máximo de la fermentación alcohólica de hexosas, calculado a partir de la ecuación de Gay-Lussac, es de 0.51 g de etanol por g de glucosa (equivalente a 0.64 L de etanol por kg de glucosa) [54]. Este valor asume que toda la glucosa se canaliza hacia etanol y CO_2 , sin pérdidas hacia otros metabolitos. Sin embargo, en condiciones industriales, los rendimientos suelen situarse entre 85 y 92 % del valor teórico, debido a la desviación de parte del carbono hacia biomasa celular, glicerol, ácidos orgánicos y otros subproductos [51].

En el caso de pentosas como la xilosa, el rendimiento teórico es ligeramente inferior, ya que su metabolismo requiere rutas alternativas como la isomerización a xilulosa y su posterior entrada en la vía de las pentosas fosfato, generando menores flujos hacia el etanol y mayores pérdidas hacia xilitol y ácido acético [49].

Si bien *S. cerevisiae* sigue siendo la levadura estándar para la producción industrial de bioetanol por su robustez, alta tolerancia a etanol y eficiencia en la fermentación de glucosa, la investigación reciente ha identificado otros microorganismos con características interesantes:

- *Zymomonas mobilis*: bacteria Gram negativa con metabolismo Entner–Doudoroff, que presenta rendimientos cercanos al teórico y elevada productividad volumétrica, aunque con rango limitado de sustratos fermentables [53].
- *Scheffersomyces stipitis* (*Pichia stipitis*): levadura capaz de fermentar eficientemente xilosa y otras pentosas, con tolerancia moderada a etanol [49].
- *Kluyveromyces marxianus*: levadura termotolerante que permite integrar procesos SSF a temperaturas más elevadas [50].
- *E. coli* recombinante: cepas modificadas para fermentar pentosas y hexosas simultáneamente, optimizando la conversión a etanol [42].

Los avances en biotecnología han permitido desarrollar cepas modificadas genéticamente con tolerancia mejorada a etanol y capacidad de fermentar mezclas complejas de azúcares. Asimismo, técnicas como la adaptación evolutiva en laboratorio (ALE) han mostrado éxito en incrementar la resistencia al estrés y mejorar la productividad [55]. Otra estrategia es el uso de co-cultivos o fermentaciones secuenciales que combinan microorganismos especializados para diferentes fracciones de azúcares, maximizando el aprovechamiento del sustrato.

A pesar del potencial de la OP y el BSG como sustratos para la producción de bioetanol, la escalabilidad del proceso enfrenta desafíos técnicos y económicos [40]. Los procesos de pretratamiento e hidrólisis requieren temperaturas elevadas, lo que incrementa el consumo energético y el costo global.

La literatura especializada señala una tendencia hacia la reducción en el consumo de insumos químicos y en la temperatura de operación, con el fin de disminuir los costos operativos, prolongar la vida útil de los equipos y reducir el consumo energético; factores determinantes para la viabilidad de procesos a gran escala [41, 56].

La fermentación requiere un control preciso de pH, temperatura y concentración de sustrato, lo que demanda el uso de sensores avanzados y biorreactores equipados con sistemas de monitoreo continuo para prevenir la inhibición metabólica. Posterior a la fermentación, las etapas de destilación y purificación del bioetanol requieren sistemas de separación que consumen cantidades significativas de energía, lo que impacta directamente en la viabilidad económica del proceso [47-48]. Por ello, la optimización de cada etapa resulta esencial para reducir los costos de operación y mejorar la competitividad del bioetanol.

1.7 Desafíos de eficiencia energética y escalamiento del bioetanol y oportunidad para reducir el déficit de etanol en México

En México, el manejo de residuos agroindustriales como el BSG y la OP presenta retos relevantes. En la región de Mexicali, Baja California, el BSG generado por microcervecerías se destina principalmente a la alimentación animal; sin embargo, la falta de infraestructura adecuada para su almacenamiento y transporte limita su aprovechamiento integral, provocando en ocasiones su acumulación y potenciales impactos ambientales debido a su alto contenido de materia orgánica y humedad [24]. Por su parte, en Veracruz, los productores de jugo de naranja generan grandes volúmenes de OP que en ocasiones exceden su capacidad de manejo, siendo el excedente dispuesto en tiraderos a cielo abierto. Esta práctica representa un riesgo de contaminación de suelos, cuerpos de agua y aire por la descomposición de la biomasa y la generación de lixiviados [39].

Estas problemáticas evidencian la necesidad urgente de desarrollar estrategias sostenibles de valorización de residuos, como su conversión a bioetanol, que fomenten la economía circular en el país.

El objetivo de este trabajo fue la valorización de residuos agroindustriales, mediante el diseño y simulación de un proceso simultáneo de extracción de aceites esenciales de cáscara de naranja y hojas de eucalipto con integración de energía solar, y la evaluación experimental de la producción de bioetanol a partir de cáscara de naranja y bagazo cervicero mediante hidrólisis ácida y fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*. Con ello se demostró el aprovechamiento de la biomasa, reducir el consumo energético y de insumos químicos, y validar el potencial de estos residuos dentro de un marco de economía circular.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelado termodinámico y simulación de la extracción de OPEO y ELEO

Se desarrolló una simulación del proceso de extracción de aceite esencial de cáscara de naranja (OPEO) y aceite esencial de eucalipto (ELEO) en Aspen Plus®. Se utilizó el modelo termodinámico *no random two liquids* (NRTL) para calcular las propiedades fisicoquímicas de todos los componentes involucrados en simulación. Se consideraron compuestos polares, no electrolitos, presiones menores a 10 bar, con interacciones binarias y equilibrio líquido-líquido. Para el OPEO se aplicó hidrodestilación y para el ELEO destilación por arrastre de vapor. En ambos procesos se generó una corriente con los componentes más volátiles del aceite esencial correspondiente, que posteriormente pasó por condensación, decantación y purificación hasta alcanzar una concentración de 97 % en peso de limoneno y 75 % en peso de 1,8-cineol. Finalmente, el agua utilizada durante el proceso fue enfriada.

Dado que la cáscara de naranja y las hojas de eucalipto no se encuentran definidas como especies químicas en la base de datos de Aspen Plus®, fue necesario representarlas mediante combinaciones de componentes puros disponibles en el simulador. Para ello, se asignaron fracciones máxicas a los compuestos que describen su composición típica (por ejemplo, agua, limoneno y fracciones lignocelulósicas), de manera que la mezcla

resultante reprodujera el comportamiento global del material vegetal. Esta estrategia de representar una biomasa real mediante una mezcla equivalente de componentes del simulador se conoce como modelo de equivalencia. Se definieron cuatro modelos de equivalencia para la simulación de los procesos de extracción de aceites esenciales: el primero para la cáscara de naranja, el segundo para la hoja de eucalipto, el tercero para el OPEO y finalmente el cuarto para el ELEO.

Las consideraciones para definir los modelos de EO se basan en los componentes con mayor proporción en los cromatogramas de aceites esenciales [57-58]. Con respecto al modelo de equivalencia de la cáscara de naranja y la hoja de eucalipto, se revisaron análisis químicos, tomando los datos reportados por Ortiz-Sánchez et al. [59] para la cáscara de naranja y por Ayala et al. [60] para las hojas de eucalipto.

Los principales componentes de la OP incluyen azúcares (23 %), celulosa (22 %), pectina (25 %), hemicelulosa (11 %), flavonoides (4.5 %) y hasta un 4 % de OPEO. La glucosa, la fructosa y la sacarosa son los azúcares solubles presentes en la cáscara de cítricos [6]. En el caso de las hojas de eucalipto, 100 % en peso se compone de lisina (4.3 %), agua (72.1 %), celulosa (6.2 %), gluten (7.7 %), ácido láurico (6.8 %), ácido palmitoleico (2.5 %) y finalmente ELEO (0.5 %). La Tabla 2 resume estos modelos de equivalencia.

Tabla 2. Modelos de equivalencia utilizados en la simulación

Orange peel		Orange peel essential oil		Eucalyptus Leaf		Eucalyptus leaf peel essential oil	
Water	50%	Limonene	90.33%	Lysine	4.3%	1.8 cineole	76.33%
Cellulose	22.50%	Sabinene	1.27%	Water	72.1%	γ -terpinene	0.73%
Dextrose	15%	β -Pinene	2.60%	Cellulose	6.2%	α -Pinene	8.35%
Lignin	10.50%	α -Pinene	1.04%	Glutein	7.7%	p-cymene	9%
OPEO	2.01%	Linalool	1.93%	Lauric Acid	6.8%	Limonene	5.24%
		γ -terpinene	2.83%	Palmitoleic Acid	2.5%	β -Pinene	0.41%
				ELEO	0.5%		

Los residuos locales de cáscara de naranja y hojas de eucalipto fueron la base para la simulación de la planta de extracción. Se emplearon 320 kg/día de cáscara de naranja y 800 kg/día de hojas de eucalipto [61]. La jornada operativa consistió en ocho extracciones de 60 min.

La demanda de agua fue de 1,920 L/día y 25,788 L/día para enfriamiento. Para el proceso de extracción de ELEO, se alimentaron 6,400 L/día de agua a una caldera y, para el enfriamiento del vapor, se necesitaron 65,800 L/día de agua. En la etapa de decantación de OPEO, se generó una corriente de agua que fue añadida al proceso de extracción de

ELEO en la etapa de condensación. El tanque de hidrodestilación usado en el proceso de OPEO operó a 140 °C y 1 atm. La caldera para el proceso de ELEO operó para convertir el flujo másico de entrada en vapor saturado. Este vapor se añadió al tanque de destilación por arrastre de vapor, que operó a 125 °C y 1 atm.

La simulación del recurso solar considera las propiedades físicas de la radiación, la relación geométrica entre el sol y la tierra, la incidencia de la radiación y las características de la superficie irradiada. Los parámetros anteriores se obtuvieron de los datos del año meteorológico típico [62] de la misma ubicación donde se recolectaron los residuos de cáscara de naranja (OPW) y hojas de eucalipto (ELW). Para el análisis del sistema de colectores, se simularon cuatro puntos de estudio, que consistieron en cuatro días diferentes del año: 30 de enero, 10 de mayo, 27 de agosto y 5 de diciembre. El proceso completo en Aspen Plus® y TRNSYS® se describe en la Figura 4.

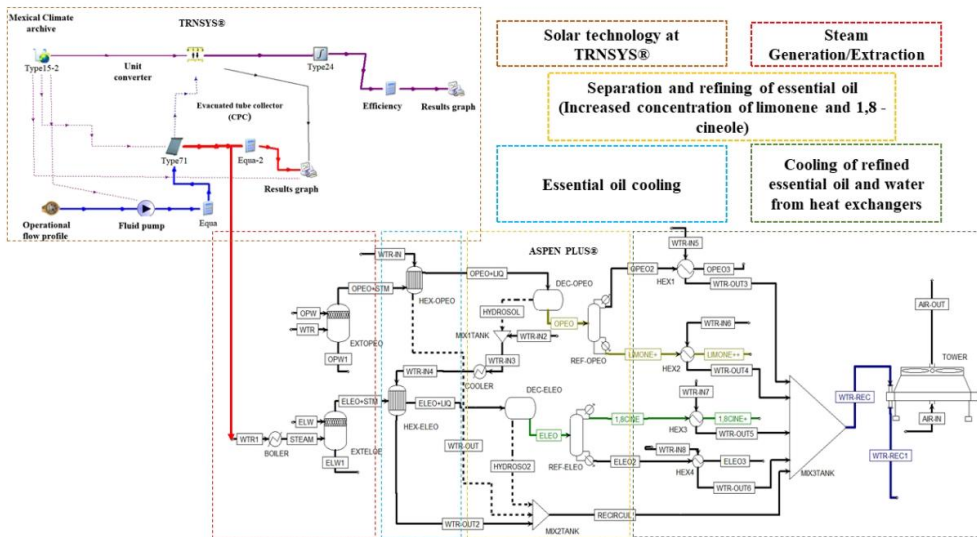


Figura 4. Proceso de extracción de aceites esenciales de cáscara de naranja y hojas de eucalipto.

El segundo bloque rojo de la Figura 4 representa la etapa de extracción. Aquí, el EXOPEO operó a 140 °C y 1 atm, y fue 40 alimentado con kg/h de OPW y 240 kg/h de agua a 25 °C. Por otro lado, la caldera convirtió el flujo de agua en vapor saturado a una

tasa de 800 kg/h, que se alimentó al EXELEO a 125 °C y 1 atm. La alimentación de hojas de eucalipto fue de 100 kg/h.

La etapa azul de la Figura 4 representa la condensación del EO. Se requirieron 3223 L/h de agua para el equipo WTR-IN, el cual condensó 260.56 kg/h de OPEO y vapor, hasta que la mezcla alcanzó los 40 °C en la corriente OPEO+LIQ. El EO mezclado con agua pasó a un decantador y, debido a la diferencia de densidades, el OPEO se separó del agua. Esta corriente se denominó HYDROSOL y se empleó en el proceso de ELEO como corriente de enfriamiento en el intercambiador de calor HEX-ELEO. Sin embargo, HYDROSOL no fue suficiente para condensar ELEO, por lo que se añadieron 8277 L/h de agua fresca al proceso en la corriente WTR-IN2. Los condensadores de ambos procesos funcionan de la misma manera, ya que la temperatura de salida del agua de enfriamiento es de 60 °C.

En la etapa de decantación y refinación, delimitada en amarillo en la Figura 4, los decantadores DEC-OPEO y DEC-OLEO operaron en condiciones ambientales. El EO se separó del agua debido a su baja miscibilidad con el solvente, así como a la diferencia de densidad y viscosidad. Ambos procesos requirieron de una columna de destilación para aumentar las concentraciones de limoneno y 1,8-cineol. La columna REF-OPEO se utilizó para la purificación de limoneno, con 21 etapas, alimentación en la etapa 10, una relación de reflujo másico de 3.5 y una relación destilado/alimentación de 0.225. La segunda columna de destilación, REF-ELEO, se usó para refinar el 1,8-cineol, con 10 etapas, alimentación en la etapa 4, una relación destilado/alimentación de 0.25 y un reflujo molar de 0.13. Estos parámetros se establecieron considerando al 1,8-cineol como el compuesto más volátil y al ácido láurico como el menos volátil.

La última sección del proceso en la Figura 4 está delineada en verde y corresponde a la etapa de enfriamiento. El objetivo fue reducir la temperatura del OPEO y el ELEO a 25 °C. Ambos procesos de extracción estuvieron conectados a una torre de enfriamiento. En total, se añadieron 33 381 kg/h de aire en la corriente AIR-ENT para enfriar el agua de la corriente WTR-REC y recircularla.

Una vez completada la simulación, se realizaron análisis de sensibilidad para estudiar las variables del proceso. La relación agua:material y la temperatura se tomaron como variables independientes. El volumen de EO se consideró como variable de respuesta. El análisis permitió estudiar rangos de relación agua:material de 40 a 200 kg/h y temperaturas de 110–150 °C en el proceso de extracción de OPEO. En el proceso de extracción de ELEO, se estudiaron rangos de relación agua:material de 100 a 800 kg h⁻¹ y temperaturas de 105–140 °C. Por otro lado, se llevó a cabo un estudio de sensibilidad en ambas columnas de destilación para encontrar la relación de reflujo y la relación

destilado/alimentación (D/F) que proporcionarán la concentración deseada de limoneno y 1,8-cineol.

El impacto de la energía solar se integró en la simulación de Aspen Plus®, incluyendo los resultados de la simulación de TRNSYS®. Se determinó el índice de energía total (TEI) antes y después de la integración de la energía solar. El TEI se definió como la cantidad de energía en kWh necesaria para obtener un litro de EO. El TEI para el proceso de OPEO considera el consumo energético del recipiente de hidrodestilación y de la columna de destilación. El TEI para el proceso de ELEO refleja la energía de la caldera, el consumo energético del extractor, del equipo de enfriamiento y de la columna de destilación. Los TEI se calcularon mediante las Ecuaciones (1) y (2).

$$TEI_{OPEO} = \frac{(Q_{InHD} + Q_{InColumnOPEO})}{V_{OPEO}} \quad (1)$$

$$TEI_{ELEO} = \frac{(Q_{Boiler} + Q_{Extractor} + Q_{Cooler} + Q_{Incolumn})}{V_{ELEO}} \quad (2)$$

donde Q_{InHD} se refiere a la energía suministrada al hidrodestilador en kWh, $Q_{InColumnOPEO}$ es la energía requerida en la columna de destilación en kWh, y V_{OPEO} denota el volumen de OPEO en Q_{Boiler} se refiere a la energía de la caldera en kWh, $Q_{Extractor}$ es la energía del equipo de extracción en kWh, Q_{Cooler} denota el calor retirado del flujo de enfriamiento en kWh, $Q_{InColumn}$ es la energía de la columna de refinación en kWh, y V_{ELEO} representa el volumen de EO de eucalipto obtenido en litros.

2.2 Recolección y preparación de muestras en la etapa experimental de obtención de bioetanol

La OP se recolectó de un proceso a escala piloto de extracción de EO, utilizando las condiciones de operación descritas por Armenta et al. (2023) [63]. Por otro lado, BSG se recolectó de una cervecería local en Mexicali, Baja California, inmediatamente después de la etapa de clarificación (lautering), utilizando recipientes limpios y herméticos para preservar su humedad y contenido orgánico como se muestra en la Figura 5. Después de la recolección, el BSG se almacenó durante 48 h a una temperatura controlada de 4 °C para evitar cualquier proceso de fermentación no controlado, mientras que la OP se procesó dentro de las primeras 24 h. Con fines exclusivos de diseño experimental, las

muestras de OP fueron sometidas a un tratamiento térmico en una mufla Thermolyne™ a 65 °C durante 24 h.



Figura 5. Bagazo cervecero (BSG) y cáscara de naranja (OP) utilizados como materias primas, acondicionados y preparados para su hidrólisis ácida bajo condiciones controladas.

2.3. Diseño experimental para hidrólisis

Se realizaron dos diseños factoriales para determinar las condiciones más efectivas en la liberación de glucosa y xilosa, uno para OP y otro para BSG. Para OP, los factores y sus niveles fueron: tiempo (1 y 2 h), concentración de H_2SO_4 (0, 0.5 y 1% v/v) y temperatura (100 y 125 °C). Los tratamientos se aplicaron por duplicado y de forma aleatoria. Los factores y niveles se seleccionaron con base en las características fisicoquímicas de la OP y en la literatura [64]. Las muestras de OP se mezclaron en una proporción de 10 g por 40 mL de H_2SO_4 a la concentración correspondiente y se sometieron a hidrólisis en la mufla Thermolyne™ al tiempo y temperatura definidos en el diseño factorial. Posteriormente, las muestras se enfriaron y el pH se ajustó entre 4.8 y 5.2 usando NaOH 0.5 N.

El diseño experimental para BSG evaluó dos factores: temperatura (130, 160 y 200 °C) y concentración de H_2SO_4 (1%, 2.5% y 5% v/v). Las variables de respuesta fueron las concentraciones de glucosa y xilosa, con cada tratamiento realizado por duplicado y de forma aleatoria. Los factores y niveles se seleccionaron en función de las características fisicoquímicas del BSG y estudios previos [8,10,11,13,19]. Las muestras de BSG se mezclaron en una proporción de 10 g de BSG seco por 60 mL de H_2SO_4 a la concentración correspondiente y se sometieron a hidrólisis durante 20 min en la mufla Thermolyne™ como se muestra en la Figura 6. Dado que el BSG ya ha sido fermentado previamente en cervecerías locales, este residuo requiere tiempos de hidrólisis más cortos, ya que tiempos más prolongados pueden generar inhibidores de fermentación como el furfural [65].



Figura 6. Preparación y análisis de hidrolizados de BSG y OP bajo distintas condiciones de hidrólisis ácida y medición de pH previa a la fermentación.

La significancia estadística de cada factor y sus interacciones se determinó mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$), utilizando el software Minitab®.

La cuantificación de azúcares reductores en las muestras de OP y BSG se realizó utilizando un espectrofotómetro UV-VIS-3100PC y el método DNS. La solución DNS se preparó con 2.5 g de ácido 3,5-dinitrosalicílico, 7.5 g de tartrato de sodio-potasio y 4 g de NaOH. Se construyeron curvas de referencia para glucosa y xilosa usando diferentes concentraciones en g/L. Se eligieron glucosa y xilosa por su mayor concentración en OP y BSG [65-67]. Los puntos estándar de ambas curvas de calibración se mezclaron con solución DNS en una relación 1:1, se calentaron en baño de ebullición por 5 min y luego se enfriaron a temperatura ambiente [65-66]. Las muestras se diluyeron 20 veces para OP y 40 veces para BSG. Posteriormente, se mezcló un alícuota de cada muestra con solución DNS en relación 1:1, se calentó 5 min en baño de ebullición y se enfrió a temperatura ambiente. Una alícuota de 1 mL de cada hidrolizado diluido se mezcló con 1 mL de solución DNS como se muestra en la Figura 7. Cada curva de calibración para glucosa y xilosa se midió a 575 nm. Todas las muestras de OP y BSG se compararon con sus respectivas curvas de calibración.



Figura 7. Muestras para cuantificación de glucosa y xilosa por DNS en el equipo UV-PC

2.4. Modelado de superficie de respuesta

El ajuste de regresión y modelado estadístico para curvas y superficies se realizó con MATLAB® R2025a. Se implementaron ecuaciones polinómicas de segundo orden para describir el comportamiento de las variables de respuesta (glucosa y xilosa) en función de los factores experimentales. El ajuste del modelo se validó mediante los coeficientes de determinación (R^2) y el análisis de residuos.

Las gráficas de superficie de respuesta se generaron con un enfoque de datos interpolados utilizando funciones cúbicas en MATLAB®. Estas superficies permitieron visualizar el efecto combinado de la temperatura y la concentración de ácido en la liberación de glucosa y xilosa tanto de la OP como del BSG. Los datos se obtuvieron a partir de los resultados del diseño experimental.

2.5. Fermentación de cáscara de naranja y bagazo cervecero

Tras evaluar el diseño factorial para la hidrólisis de ambos residuos, se seleccionaron los niveles óptimos de los tres factores estudiados para proceder a la etapa de fermentación. Las condiciones fueron: para OP, temperatura de 125 °C, concentración de ácido 0% v/v H_2SO_4 y 1 h; para BSG, temperatura de 130 °C, concentración de ácido 2.5% v/v H_2SO_4 y 20 min, con una relación OP:solvente de 1:1 y para BSG:solvente de 0.7:1 [55,56]. Esta relación se seleccionó ya que no es un factor significativo en la hidrólisis según la literatura [68].

Se mezclaron 100 g de OP húmeda, aprovechando su hidratación, con 100 mL de agua y se sometieron a hidrólisis a escala de laboratorio. La mezcla resultante se filtró para

obtener un jarabe concentrado (Figura 9). Un total de 70 g de BSG húmedo se mezcló con 100 mL de agua y se sometió a hidrólisis en presencia de ácido sulfúrico diluido al 2.5%. El hidrolizado se neutralizó con hidróxido de sodio y posteriormente se filtró para obtener un jarabe concentrado (Figura 9).

Se seleccionó *Saccharomyces cerevisiae* como levadura para fermentar OP y BSG debido a su alta disponibilidad comercial, facilidad de escalado del proceso, menor formación de productos indeseados en la etapa de fermentación y su capacidad de fermentar glucosa, que es el azúcar principal presente en OP y BSG [24]. La fermentación se realizó a 28, 30 y 32 °C, añadiendo 3 g de levadura por cada 200 mL de filtrado en el equipo de la Figura 8.



Figura 8. Incubadora empleada en la fermentación alcohólica para mantener condiciones controladas de temperatura y agitación durante la producción de bioetanol.

De acuerdo con la literatura para OP y BSG, y en función de la concentración de H_2SO_4 en la hidrólisis, el tiempo de fermentación se fijó en 5 días [69-73], es decir, 2 días más que los 3 días estándar. El procedimiento se replicó por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados. El diagrama del proceso para cada residuo se presenta en la Figura 9.

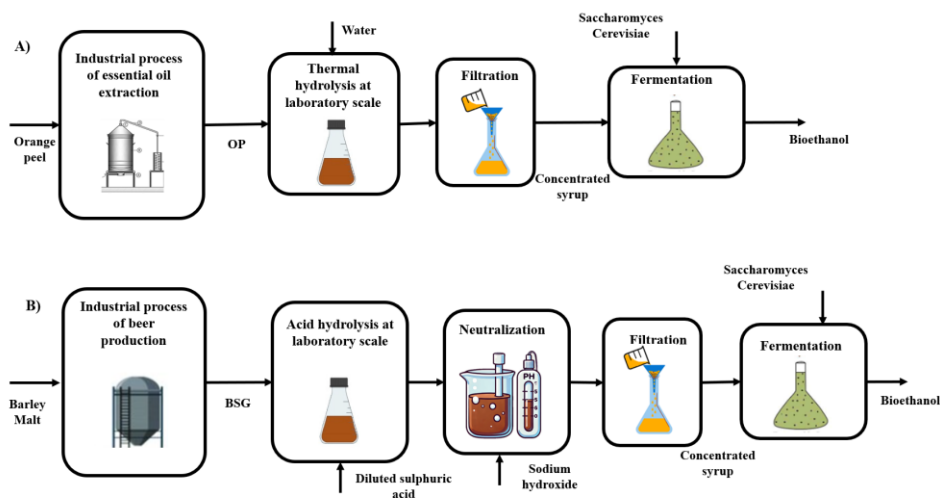


Figura 9. Esquema del proceso de producción de bioetanol a partir de OP y BSG: hidrólisis, filtración, fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* y destilación.

La concentración de bioetanol en los hidrolizados fermentados se determinó mediante refractometría, una técnica rápida y confiable para fermentaciones alcohólicas, alcanzando una precisión de $R^2 = 0.975$ [74]. El equipo utilizado fue un refractómetro digital (Abuycs ATC-MR0008). Antes de cada medición, el dispositivo se calibró con agua destilada a 20 °C, y las lecturas se realizaron por triplicado, comparándolas con valores obtenidos de alcohol estandarizado y sus respectivas diluciones.

2.6. Modelado cinético de la producción de bioetanol y estimación de parámetros

En la Ecuación 3, $C_{bioethanol}$ representa la concentración de etanol en función del tiempo (g/L), $C_{maxbioethanol}$ es la concentración máxima alcanzable de etanol (g/L), k es la velocidad específica de producción de etanol (1/h) y t_0 es el tiempo de inflexión que marca el final de la fase de latencia (h). Este modelo es válido, ya que refleja con mayor precisión el comportamiento de la producción de etanol durante la fermentación. Inicialmente, la concentración de etanol es cero y sigue una curva sigmoideal, comenzando con una fase de latencia ($t \ll t_0$) en la que la producción permanece baja debido al crecimiento lento de la levadura. Posteriormente, en la fase exponencial ($t \approx t_0$), la producción de etanol aumenta rápidamente por la proliferación celular. Finalmente, en la fase estacionaria ($t \gg t_0$), la producción se estabiliza en $C_{maxbioethanol}$ por agotamiento de nutrientes o inhibición por acumulación de etanol. Se aplica una regresión no lineal para ajustar los parámetros Ecuación 3, y se generaron las Ecuaciones 4 y 5 [74].

$$C_{\text{bioethanol}}(t) = \frac{C_{\text{maxbioethanol}}}{1 + e^{k(t-t_0)}} \quad (3)$$

2.7. Proyección del potencial de producción de bioetanol

El potencial anual de producción de bioetanol a partir de OP y BSG en México se estimó mediante un enfoque de extrapolación. Este método se basó en rendimientos experimentales obtenidos en laboratorio y en datos nacionales sobre la generación y disponibilidad de estos residuos agroindustriales.

Para determinar la disponibilidad de biomasa, se consultaron reportes de producción nacional relacionados con las industrias cítrica y cervecera [29,75,78]. Para la cáscara de naranja, se consideró únicamente la fracción recuperable del total generado en el procesamiento de jugo. En el caso del bagazo cervecero, la producción se estimó a partir del volumen nacional de producción de cerveza, aplicando una razón técnica promedio que vincula la cantidad de residuo generado con el volumen de producto fabricado.

Los rendimientos experimentales de etanol utilizados para la proyección se seleccionaron a partir de los resultados más altos de fermentaciones controladas en condiciones de laboratorio, utilizando *Saccharomyces cerevisiae* como microorganismo fermentador. Los datos se expresaron en términos del volumen de etanol producido por unidad de biomasa húmeda tratada y, posteriormente, se emplearon como base para proyectar un escenario de aprovechamiento a escala nacional.

Por último, el volumen estimado se utilizó para realizar comparaciones con otros referentes internacionales, como plantas de bioenergía en América Latina, con el fin de analizar el impacto potencial de la valorización de estos residuos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Producción de EO y TEI

El proceso de extracción de OPEO requirió 192 kW con 3,223.62 kg/h de agua de enfriamiento en el equipo de hidrodestilación (EXOPEO). La etapa de decantación separó 0.95 L/h de OPEO con una concentración de limoneno de 92 % en peso. En el proceso de ELEO, la energía requerida para generar la corriente de vapor fue de 584 kW. Para enfriar la mezcla de vapor y aceite esencial, se suministraron 8,487.59 kg/h de agua a 4 °C. La etapa de decantación separó 5.6 L/h de ELEO con una concentración de 1,8-cineol de 18 % en peso.

Para incrementar la concentración de limoneno, la columna de destilación para OPEO requirió 0.146 kW de calor para su operación, resultando en una producción de 0.91 L/h de OPEO al 97 % en peso de limoneno. Para ELEO, la columna de destilación requirió 0.95 kW, lo cual permitió separar el ácido láurico de la mezcla, obteniéndose 1,408 L/h de ELEO con una concentración de 75 % en peso de 1,8-cineol. El agua de enfriamiento

utilizada fue recirculada en cada extracción durante la jornada operativa. Se utilizó aire como intercambiador de calor en una torre de enfriamiento, la cual requirió 475 kW para enfriar 12,566.5 kg/h de agua.

En el trabajo experimental de Bustamante [57], se obtuvo un rendimiento de 0.0192 L de OPEO por kg de OPW y un TEI de 553.84 kWh/L de EO. En el presente trabajo, se alcanzó un rendimiento de 0.02175 L de OPEO por kg de OPW y el TEI fue de 202.1 kWh/L de EO antes de la integración de energía solar. En comparación con el trabajo de Bustamante [20], esta simulación logró un mayor rendimiento de 11.72 % y una disminución del TEI en 63.51 %.

En el trabajo experimental de Romdhane [58], se obtuvo un rendimiento de 0.0434 L de ELEO por kg de ELW y un TEI de 368 kWh/L de ELEO. En el presente trabajo, se alcanzó un rendimiento de 0.056 L de ELEO por kg de ELW y el TEI fue de 579 kWh/L para ELEO previo a la integración solar. En comparación con el trabajo de Romdhane [58], esta simulación logró un mayor rendimiento de extracción de 22.5 %, aunque el TEI se incrementó en 57.33 %. Esto ocurrió debido a que las condiciones de enfriamiento del ELEO fueron diferentes, añadiendo un consumo energético adicional al proceso de extracción presentado en este trabajo.

3.2 Análisis de sensibilidad sobre las condiciones de entrada

La Figura 10 muestra el gráfico de superficie de respuesta del efecto de la relación agua:OPW y la temperatura de hidroddestilación sobre el volumen de OPEO obtenido. La zona con mayor producción de OPEO se encuentra en el área roja de la Figura 10, con 140 °C y una relación de 6:1 de agua:OPW. Estas fueron las condiciones de entrada en la simulación. El efecto de la relación de agua es una consideración importante para lograr el máximo rendimiento de extracción. Al aumentar la cantidad de agua por encima de la relación 6:1 de agua:OPW, el volumen de OPEO permanece constante.

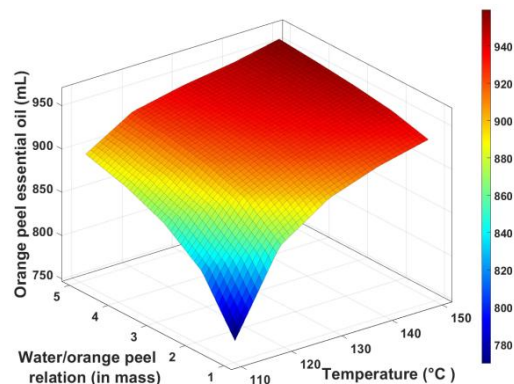


Figura 10. Superficie de respuesta para el proceso de extracción de OPEO.

La Figura 11 muestra el gráfico de superficie de respuesta del efecto causado por la relación agua:ELW y la temperatura del extractor sobre el volumen de ELEO. El área roja representa la mayor producción de ELEO, a 125 °C y con una relación de 8:1 de agua:ELW. En este caso, la relación se refiere a la cantidad de vapor de agua que pasa a través del ELW en el equipo extractor. Usar una relación superior a la sugerida provoca una mayor extracción de ácido láurico en la corriente de vapor, lo que afecta negativamente la purificación de 1,8-cineol.

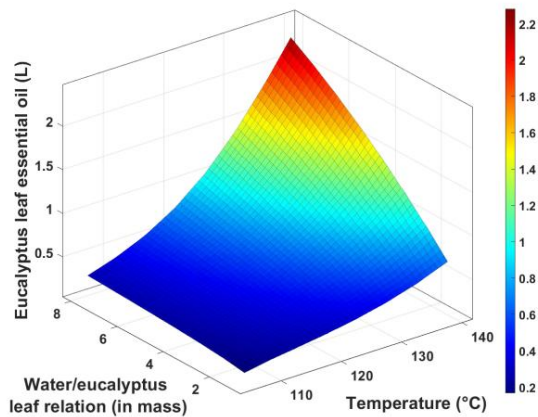


Figura 11. Superficie de respuesta para el proceso de extracción de ELEO.

Para refinar el 1,8-cineol, también se incorporó una columna de destilación donde la composición aumentó hasta 75 % en peso, con una relación de reflujo de 0.13 y una relación D/F de 0.185, también observable en la Figura 12b.

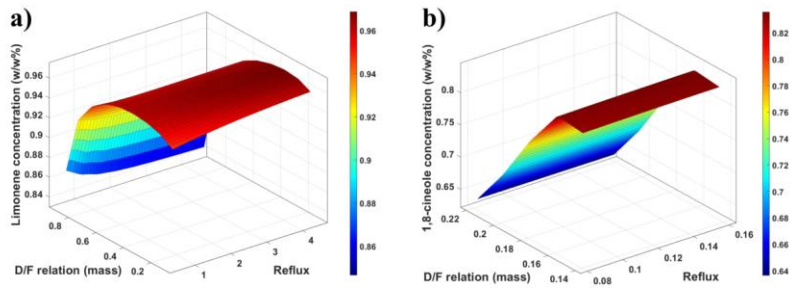


Figura 12. Superficie de respuesta para las columnas de destilación: (a) para OPEO, (b) para ELEO.

La Figura 13 demuestra que el TEI es más favorable cuando la hidrodestilación opera a 140 °C. En este punto ocurrió la mejor relación de extracción de aceite esencial con la energía suministrada. A medida que la temperatura aumentó por encima de 110 °C, el TEI disminuyó.

De manera similar, en la Figura 13b se observa que el TEI es favorable a 125 °C. Por esta razón, se tomó como dato de entrada para las condiciones de la caldera en el proceso de extracción de ELEO.

Las ecuaciones que describen los procesos de extracción de OPEO y ELEO se presentan a continuación. La Ecuación (4) resultó con un coeficiente de correlación de 0.9912 y la Ecuación (5) con 0.992.

$$TEI_{OPEO} = 0.0089T^2 - 2.5528T + 384.43 \quad (4)$$

$$TEI_{ELEO} = 3.1669T^2 - 797.86T + 50.915 \quad (5)$$

TEI_{OPEO} y TEI_{OLEO} representan el índice total de energía para los procesos de extracción de OPEO y ELEO, respectivamente, y T es la temperatura de operación del equipo extractor.

Para alcanzar 45 °C de OPEO a la salida del condensador, se requirieron 3,223 kg/h de agua a 25 °C. Los parámetros de diseño del intercambiador de calor para este proceso fueron un área de transferencia de 4.45 m² y un coeficiente global de transferencia de calor de 3785.28 J / (s · K).

En el proceso de ELEO se incorporó un enfriador de agua para alcanzar 4 °C del agua de enfriamiento. Este equipo fue directamente proporcional a la temperatura ambiente de la ciudad de Mexicali, que varía entre 9–42 °C. Los parámetros de diseño del intercambiador de calor para el proceso de ELEO fueron un área de transferencia de 9.33 m² y un coeficiente de transferencia de calor de 7,932.6 J / (s · K).

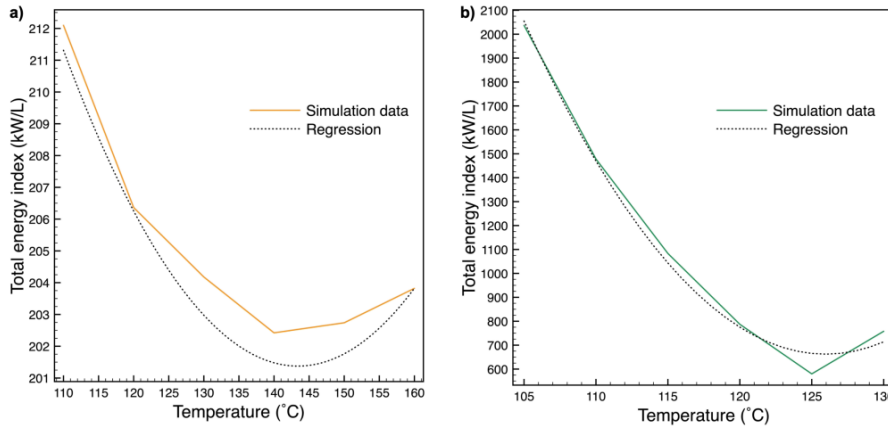


Figura 13. Índice total de energía (TEI) para el proceso de extracción: (a) OPEO, (b) ELEO.

De acuerdo con los requerimientos de temperatura y caudal del proceso, la disposición propuesta por TRNSYS® indicó el uso de colectores solares de tubos evacuados con un reflector parabólico en la parte inferior. El arreglo de colectores consistió en cinco conjuntos conectados en paralelo y, para cada conjunto, cinco colectores conectados en serie. El área total de captación solar fue de 110.25 m².

La Figura 14 muestra los resultados de radiación solar y temperatura para los cuatro días de estudio. El 30 de enero, representado en la Fig. 14a, se observa que la temperatura máxima alcanzada fue de 92 °C y la mínima de 16 °C. La temperatura promedio fue de 71.6 °C y la radiación promedio de 615 W/m². Usando estas condiciones en la simulación, se obtuvo un ahorro promedio de energía del 10% en la caldera para la generación de vapor en el proceso de extracción de ELEO.

La Fig. 14b indica que el 10 de mayo se registraron temperaturas más altas que en enero, pero también hubo una caída pronunciada en la temperatura durante las horas pico del día. La temperatura máxima fue de 98 °C y la mínima de 27.09 °C. La temperatura promedio fue de 75.95 °C y la radiación promedio de 650 W/m². La reducción del consumo de energía en la caldera fue del 9 %, 1 % menos en comparación con enero. Esto ocurrió porque la temperatura del agua ambiente fue de 24 °C en mayo y 18 °C en enero. Aunque en mayo se alcanzaron mayores radiaciones y temperaturas, la eficiencia de la implementación de colectores solares se redujo porque el gradiente de temperatura entre los flujos de agua de entrada y salida fue menor.

La Fig. 14c analiza los datos del 27 de agosto. La temperatura máxima alcanzada fue de 98.1 °C, la mínima de 33.53 °C, y se obtuvo una temperatura promedio de 79.1 °C con una radiación promedio de 606 W/m² y una temperatura de entrada del agua de 33 °C.

La reducción del consumo de energía en la caldera fue de 8.63 %. Este comportamiento fue similar al presentado en la Fig. 14b.

En la Fig. 14d se analizó el 5 de diciembre. La temperatura máxima alcanzada fue de 94.87 °C, con una mínima de 17.49 °C, y se obtuvo una temperatura promedio de 71.96 °C con una radiación promedio de 537 W/m² y una temperatura de entrada de agua de 21 °C. La reducción del consumo de energía en la caldera fue de 8.64 %.

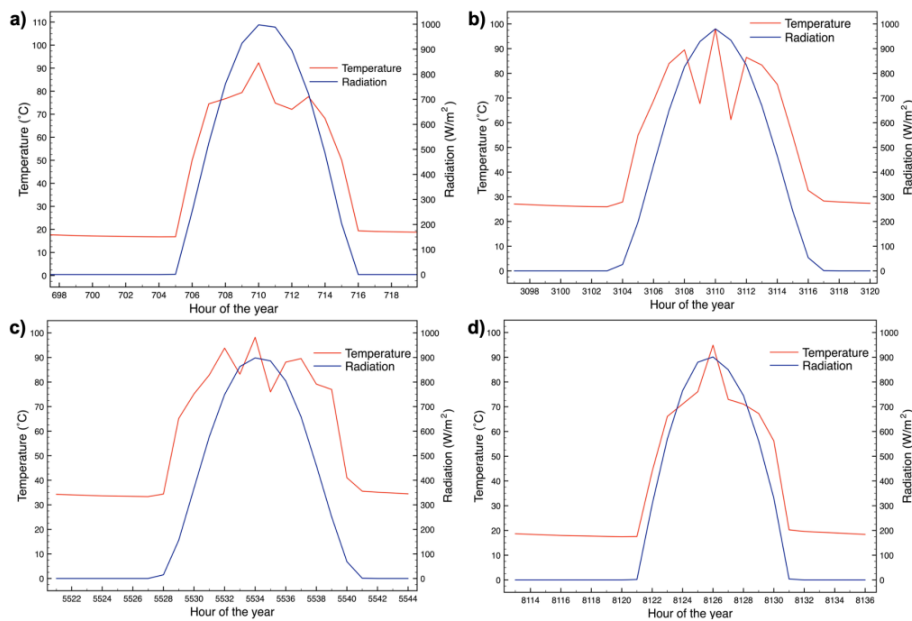


Figura 14. Perfil de temperatura del agua a la salida del colector solar y radiación en diferentes días del año: (a) 30 de enero, (b) 10 de mayo, (c) 27 de agosto, (d) 5 de diciembre.

En la Fig. 15 se observó una reducción promedio del 9.06 % del TEI al integrar la energía solar al proceso de ELEO, con un comportamiento similar en los cuatro días de estudio. Los resultados indican que el acoplamiento de 25 colectores solares con un área de captación de 110 m² permite obtener un rango de temperatura de 75–95 °C. La variación de este rango dependió de las condiciones climáticas del año. Con estos valores, se obtuvo un ahorro anual promedio de energía de hasta el 10 % en la caldera para la generación de vapor en el proceso de extracción de ELEO.

				se							
				(g/L)							
0	100	1	29.5	32.94	31.22	2.43	9.33	10.37	9.85	0.73	
		2	31.81	33.45	32.63	1.16	9.99	10.49	10.24	0.35	
	125	1	39.34	39.94	39.64	0.42	12.13	12.53	12.33	0.28	
		2	45.23	51.63	48.43	4.52	13.79	15.51	14.65	1.21	
0.5	100	1	36.88	45.76	41.32	6.28	11.4	14	12.7	1.84	
		2	41.49	44.89	43.19	2.41	12.72	13.66	13.19	0.67	
	125	1	43.16	52.14	47.65	6.35	13.18	15.7	14.44	1.78	
		2	50.96	51.02	50.99	0.04	15.4	15.42	15.41	0.02	
1	100	1	26.95	30.79	28.87	2.71	8.59	11.41	10	1.99	
		2	27.46	32.82	30.14	3.79	8.74	10.86	9.8	1.5	
	125	1	41.12	49.58	45.35	5.98	13.26	14.44	13.85	0.83	
		2	46.16	47.72	46.94	1.11	14.08	14.56	14.32	0.34	

Tabla 4 presenta el ANOVA, que indica que tanto la concentración de H_2SO_4 (A) como la temperatura (B) tuvieron efectos estadísticamente significativos (valores $p < 0.05$) sobre la producción de glucosa y xilosa. En contraste, el tiempo (C) y las interacciones entre factores no mostraron significancia estadística ($p > 0.05$). Por lo tanto, la concentración de ácido y la temperatura son factores críticos para la liberación de glucosa y xilosa, mientras que extender el tiempo de reacción de 1 a 2 h no produjo un aumento significativo. Aunque la concentración de H_2SO_4 fue significativa, la diferencia observada de aproximadamente 3 g/L sugiere que enfocarse en un tratamiento principalmente térmico podría ser más ventajoso en términos de ahorro de ácido sulfúrico y de hidróxido de sodio para la neutralización. La reducción en la producción de glucosa y xilosa a medida que aumenta la concentración de ácido sulfúrico se atribuye a la conversión de azúcares en furfural y 5-hidroximetilfurfural [79], lo cual impacta negativamente el rendimiento de glucosa y xilosa. Además, se observa que la temperatura tiene la mayor contribución a las variables de respuesta de glucosa y xilosa en comparación con la concentración de ácido.

Tabla 4. Análisis de varianza para la concentración de glucosa y xilosa en OP.

Source	Glucose					Xylose				
	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-Value	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-Value
Concentration (A)	331.68	2	165.84	6.48	0.01	22.71	2	11.35	4.69	0.03
Temperature (B)	855.1	1	855.1	33.41	<0.00	61.43	1	61.4	25.37	<0.00
Time (C)	55.61	1	55.61	2.17	0.16	3.30	1	3.3	1.37	0.27
AB	91.74	2	45.87	1.79	0.21	5.04	2	2.52	1.04	0.38
AC	14.11	2	7.05	0.28	0.76	1.48	2	0.74	0.31	0.74
BC	13.98	1	13.98	0.55	0.47	1.58	1	1.57	0.65	0.43
ABC	14.38	2	7.19	0.28	0.76	0.61	2	0.3	0.13	0.88
Error	307.17	12	25.6	-	-	29.06	12	2.42	-	-
Total	1,683.74	23	-	-	-	125.25	23	-	-	-

La Figura 16 presenta las superficies de respuesta que ilustran el efecto combinado de la concentración de H_2SO_4 y la temperatura sobre la liberación de azúcares tras 1 y 2 h de tratamiento. El punto de mayor producción, de acuerdo con la Figura 2, fue de 51.14 g/L para glucosa y 15.42 g/L para xilosa, a 125 °C, 0.25 % v/v de H_2SO_4 y 2 h. La mayor liberación de glucosa respecto a la xilosa se atribuye a la composición estructural del sustrato, que contiene una proporción más alta de celulosa en relación con la hemicelulosa. Estos hallazgos respaldan la aplicación de condiciones de pretratamiento suaves y controladas para optimizar la recuperación de glucosa y xilosa, minimizando al mismo tiempo los subproductos de degradación térmica.

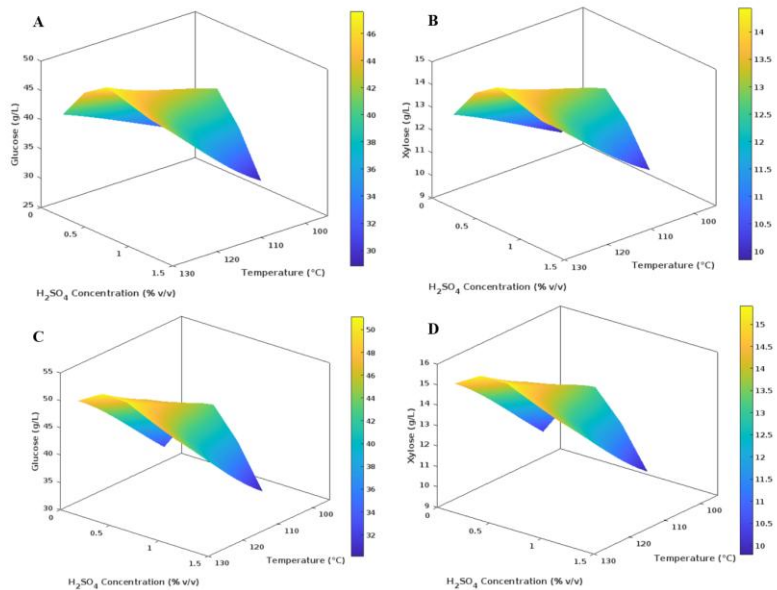


Figura 16. Superficies de respuesta de la concentración de ácido sulfúrico (% v/v) y la temperatura (°C) sobre la liberación de glucosa (A, C) y xilosa (B, D) durante la hidrólisis de cáscara de naranja (OP) a 1 h (A, B) y 2 h (C, D).

Se realizó un análisis de residuos para evaluar la validez de los modelos de regresión aplicados a los datos de concentración de glucosa y xilosa en la Figura 17. Los gráficos de residuos estandarizados frente a los valores ajustados (Figura 17A) muestran una dispersión aleatoria alrededor de cero, lo que indica que los errores del modelo están uniformemente distribuidos y no siguen un patrón definido. Sin embargo, se observa un ligero agrupamiento de residuos en los valores ajustados más bajos tanto para glucosa como para xilosa (Figura 17C), lo cual puede reflejar cierta variabilidad no explicada completamente por el modelo en esa región, aunque no afecta de manera significativa la validez global del mismo.

Por otro lado, las gráficas de probabilidad normal (Figuras 17B–17D) muestran que la mayoría de los residuos siguen de cerca la recta teórica esperada, lo que sugiere que están distribuidos aproximadamente de forma normal. Las desviaciones en los extremos, particularmente para la glucosa, podrían atribuirse a variación experimental o a la presencia de valores atípicos leves. En conjunto, el análisis de residuos respalda la adecuación de los modelos ajustados para describir el comportamiento de la hidrólisis bajo las condiciones estudiadas.

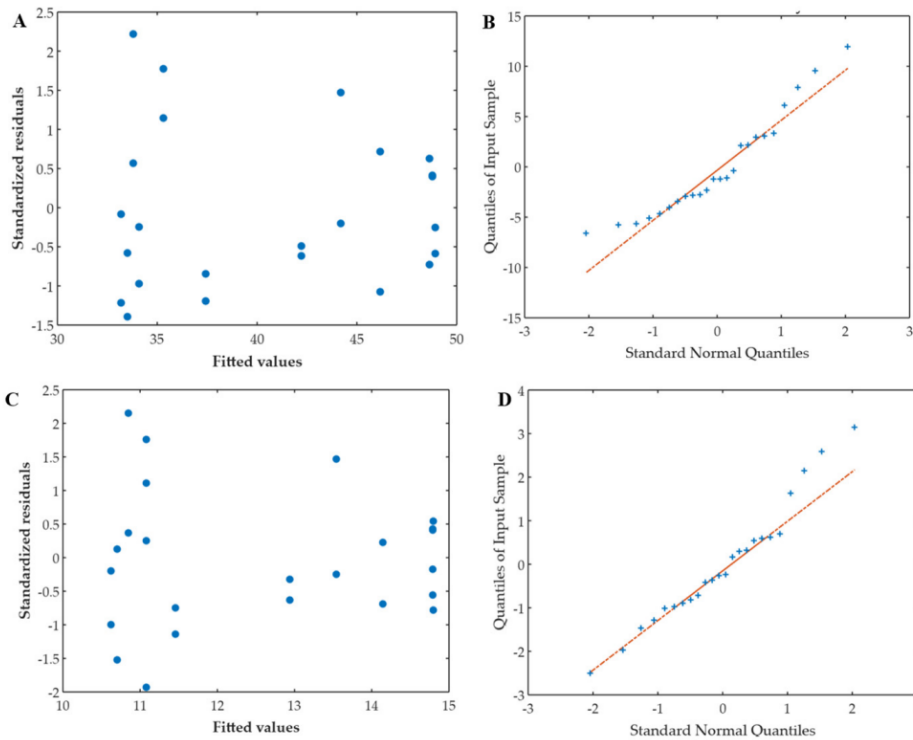


Figura 17. Análisis de residuos (A, C) y gráficos de probabilidad normal (B, D) de los modelos ajustados para glucosa y xilosa obtenidas de hidrolizados de cáscara de naranja (OP).

Con base en el análisis estadístico mediante regresión lineal múltiple con términos de interacción, se desarrollaron modelos predictivos para estimar las concentraciones de glucosa y xilosa liberadas durante la hidrólisis ácida de la biomasa, independientemente de si esos términos fueron significativos o no, tal como se describen en la **Ecuación 6 y en la Ecuación 7**, respectivamente. Estos modelos consideran la concentración de ácido sulfúrico ($C_{H_2SO_4}$), la temperatura (T) y el tiempo (t) como variables independientes, junto con las interacciones bilineales entre estos factores.

$$\text{Glucose (g/L)} = 10.3536 - 15.0035 C_{H_2SO_4} + 0.2039 T + 0.1810 C_{H_2SO_4} \cdot T - 3.6755 C_{H_2SO_4} \cdot T + 0.1221 T \cdot t$$

(6)

$$\text{Xylose (g/L)} = 4.6331 - 1.3015 C_{H_2SO_4} + 0.0515 T + 0.098 C_{H_2SO_4} \cdot T - 1.2185 C_{H_2SO_4} \cdot T + 0.0410 T \cdot t$$

(7)

Comentado [Ui2]: ecuaciones?

De manera similar, la Tabla 5 presenta las concentraciones promedio de glucosa y xilosa a partir de dos réplicas y sus desviaciones estándar, con base en el diseño factorial general con porcentaje de ácido sulfúrico (% v/v) y temperatura durante la hidrólisis del bagazo cervicero (BSG). Para el BSG, los mejores resultados se obtuvieron con 2.5% de H₂SO₄ a 160 °C, produciendo 27.10 g/L de glucosa y 14.22 g/L de xilosa.

Tabla 5. Resultados de concentración de glucosa y xilosa para BSG (D.E., desviación estándar).

Concentration H ₂ SO ₄ (%)	Temperature (°C)	Glucose (g/L)				Xylose (g/L)			
		Replicate 1	Replicate 2	Mean Glucose (g/L)	S.D.	Replicate 1	Replicate 2	Mean Xylose (g/L)	S.D.
1	200	15.6	16.2	15.9	0.42	5.1	5.52	5.31	0.3
2.5		23.7	23.98	23.84	0.2	9.15	11.21	10.18	1.46
5		19.85	21.95	20.9	1.48	9.85	11.89	10.87	1.44
1	160	15.66	17.67	16.67	1.42	5.37	7.37	6.37	1.42
2.5		22.9	27.1	25	2.97	10.21	14.22	12.22	2.84
5		20.87	22.88	21.88	1.42	12.04	14.05	13.04	1.42
1	130	12.85	16.95	14.9	2.9	5.17	5.98	5.58	0.57
2.5		18.9	25.1	22	4.38	10.38	11	10.69	0.44
5		17.95	20.05	19	1.48	11.71	11.12	11.41	0.42

El ANOVA de la Tabla 6 indica que tanto la concentración de H₂SO₄ como la temperatura tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la liberación de glucosa y xilosa, mientras que la interacción entre estos factores no es significativa. En específico, con una concentración de 2.5% de H₂SO₄, la producción de glucosa fue de 22.0 g/L a 130 °C y de 25.0 g/L a 160 °C, lo que refleja un incremento de 3.0 g/L al elevar la temperatura. Bajo las mismas condiciones de temperatura, la producción de xilosa aumentó de 10.69 a 12.22 g/L, lo que representa una mejora de aproximadamente 1.53 g/L.

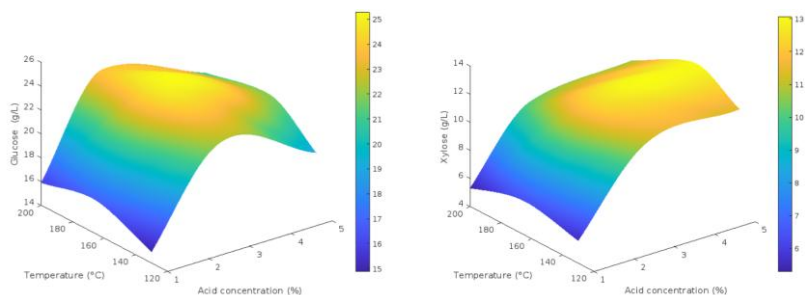
Tabla 6. Análisis de varianza para la concentración de glucosa y xilosa en BSG (bagazo cervicero).

Source	Sum of Squares	Glucose				Xylose				
		D F	Mean Square	F-Value	p-Value	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Value	p-Value
Concentration (A)	115.96	2	57.98	189.25	<0.00	130.47	2	65.23	337.24	<0.00

Temperature (B)	20.80	2	10.4	33.96	<0.00	9.96	2	4.98	25.76	<0.00
AB	1.42	4	0.36	1.18	0.37	0.77	4	0.19	0.99	0.45
Error	2.76	9	0.31	-	-	1.74	9	0.19	-	-
Total	141.00	17	-	-	-	142.94	17	-	-	-

El consumo de energía se calculó determinando la energía necesaria para calentar 1 L de agua desde 25 hasta 130 °C y 160 °C, utilizando la capacidad calorífica específica del agua (4.18 kJ/kg·K). La energía requerida para incrementar la temperatura de 25 a 130 °C fue de 438.9 kJ, mientras que para alcanzar los 160 °C ascendió a 564.3 kJ, lo que representa un incremento del 28.6 % en el consumo energético. Este aumento en la energía suministrada se tradujo en un incremento del 13.6 % en la producción de glucosa y del 14.3 % en la producción de xilosa. El rendimiento obtenido fue de 0.0501 g/kJ para glucosa a 130 °C y de 0.0443 g/kJ a 160 °C. En el caso de la xilosa, el rendimiento fue de 0.0244 g/kJ a 130 °C y de 0.0217 g/kJ a 160 °C. Estos resultados sugieren que, si bien temperaturas más elevadas favorecen la liberación de glucosa y xilosa, también incrementan los costos energéticos, los cuales deben ser considerados en el balance global del proceso. Por lo tanto, la operación a 130 °C ofrece la mejor relación entre consumo energético y gramos de azúcares liberados.

La Figura 18 muestra las superficies de respuesta que evalúan el efecto combinado de la concentración de ácido sulfúrico y la temperatura sobre la liberación de glucosa y xilosa durante la hidrólisis del BSG. La interpolación cúbica de los datos experimentales permitió generar un modelo que ilustra cómo varían los rendimientos de azúcares en función de estas dos variables. Las condiciones intermedias favorecen la liberación de ambos azúcares, lo que sugiere un equilibrio entre la acción catalítica del ácido y el aporte térmico. Las concentraciones máximas de glucosa y xilosa se alcanzaron a 160 °C y con una concentración de 2.5 % v/v de H₂SO₄, obteniéndose 25.00 g/L y 12.22 g/L, respectivamente. Estos valores fueron identificados a través del análisis de superficies de respuesta.



A

B

Figura 18. Superficie de respuesta aplicada a la cáscara de naranja (OP) en función de la concentración de ácido (% v/v) y la temperatura (°C): (a) concentración de glucosa (g/L), (b) concentración de xilosa (g/L).

Se realizó un análisis de residuos con el fin de evaluar los modelos de regresión ajustados para predecir las concentraciones de glucosa y xilosa a partir del BSG. En las Figuras 8A y 8C, que muestran los residuos estandarizados en función de los valores ajustados, los residuos se dispersan en general alrededor de cero, lo que indica que los errores del modelo no siguen una tendencia sistemática. Sin embargo, se observa una ligera acumulación de residuos positivos en el rango intermedio de valores ajustados tanto para glucosa como para xilosa, lo cual podría reflejar cierta variabilidad asociada con condiciones experimentales específicas.

En los gráficos de probabilidad normal (Figuras 19B y 19D), los residuos se alinean razonablemente bien con la línea de referencia teórica, lo que sugiere que el supuesto de normalidad se cumple de manera general. Algunas desviaciones en los extremos podrían atribuirse a valores atípicos o a un comportamiento no lineal bajo ciertas combinaciones de temperatura y concentración de ácido.

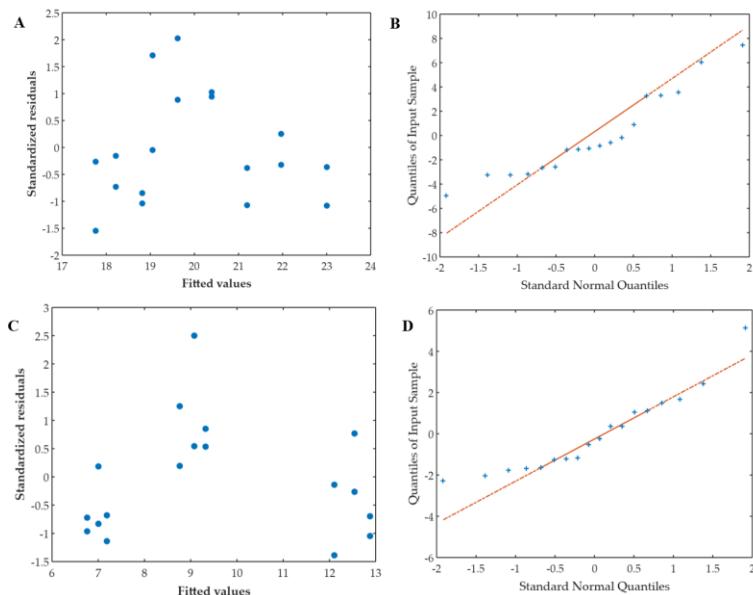


Figura 19. Análisis de residuos (A, C) y gráficos de probabilidad normal (B, D) de los modelos ajustados para las concentraciones de glucosa y xilosa obtenidas a partir de hidrolizados de bagazo cervicero (BSG).

Con base en el análisis estadístico mediante regresión lineal múltiple con términos de interacción, se desarrollaron modelos predictivos para estimar las concentraciones de glucosa y xilosa liberadas durante la hidrólisis ácida del BSG, tal como se representan en las Ecuaciones 8 y 9. Estos modelos consideran la concentración de ácido sulfúrico ($C_{H_2SO_4}$) y la temperatura (T) como variables independientes, junto con su efecto combinado a través de la interacción bilineal.

$$\text{Glucose (g/L)} = 15.3053 - 0.5047 C_{H_2SO_4} + 0.0124 T + 0.0027 C_{H_2SO_4} \cdot T \quad (8)$$

$$\text{Xylose (g/L)} = 6.4001 - 1.5799 C_{H_2SO_4} + 0.0049 T + 0.0012 C_{H_2SO_4} \cdot T \quad (9)$$

La Figura 20 compara las concentraciones experimentales y predichas de glucosa y xilosa obtenidas a partir de los hidrolizados de OP y BSG. En el caso de OP (Gráfico A), los valores predichos por el modelo de regresión de superficie de respuesta se ajustaron de manera cercana a los datos experimentales, especialmente en el caso de la xilosa. Las ligeras desviaciones observadas para la glucosa pueden atribuirse a la variabilidad experimental. Por su parte, el Gráfico B presenta los resultados para BSG, mostrando también una correspondencia consistente entre los valores medidos y los predichos. En conjunto, los modelos de regresión representan con precisión las tendencias para ambos residuos, lo que respalda su aplicabilidad en la estimación de glucosa y xilosa bajo diferentes condiciones de hidrólisis.

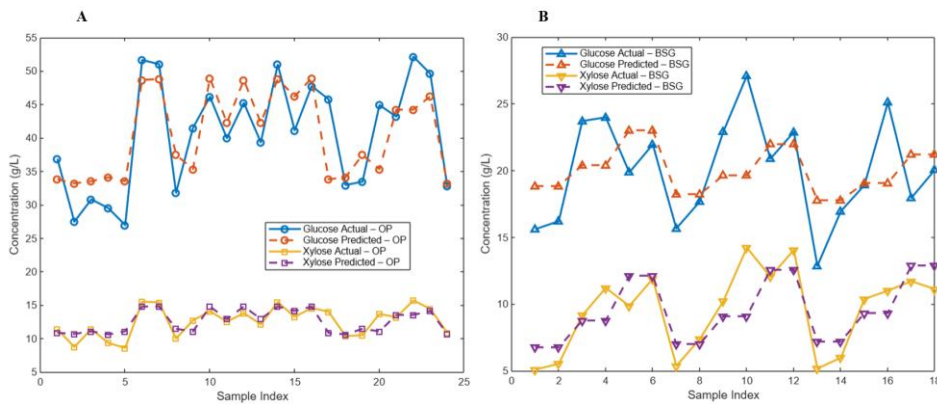


Figura 20. Comparación entre los valores experimentales y predichos de glucosa y xilosa obtenidos a partir de la hidrólisis de OP (A) y BSG (B), utilizando modelos de superficie de respuesta.

3.2. Comparación de la producción de glucosa y xilosa

La Tabla 7 presenta un rango de producción de glucosa y xilosa a partir de OP y BSG. Cada rango fue establecido a partir de las concentraciones más altas de glucosa y xilosa reportadas. Los estudios incluidos en la Tabla 7 emplearon distintos métodos, entre ellos hidrólisis ácida, hidrólisis enzimática y fluidos supercríticos. Asimismo, la Tabla 7 compara los resultados más elevados obtenidos en este estudio para la producción de glucosa y xilosa.

Tabla 7. Análisis comparativo de la producción de glucosa y xilosa a partir de OP y BSG.

Biomass feedstock	Analysis	Value (g/L)	Other studies (g/L)	Reference
OP	Glucose	50.99	1.69-79.29	32, 37, 39, 44, 45, 46, 47
	Xylose	15.41	2.30-97.14	32, 37, 39, 48
BSG	Glucose	25.08	0.31-75	33, 46, 47, 48, 49
	Xylose	13.00	1.22-17.3	33, 47, 48, 49, 50,

El presente estudio logró concentraciones competitivas de glucosa y xilosa mediante hidrólisis y ofrece ventajas significativas. Por ejemplo, aunque Córtes Ortiz et al. (2020) reportaron concentraciones más altas de glucosa, su método requirió un proceso de deslignificación con NaOH y posterior hidrólisis con 13.3 % de ácido sulfúrico, lo que lo convierte en un procedimiento químico más complejo que implica el uso de reactivos adicionales [70]. De manera similar, Kuo et al. (2019) alcanzaron concentraciones elevadas de glucosa y xilosa, pero su metodología involucró enzimas específicas y un tiempo de reacción de 5.5 h, lo que encarece el proceso [71]. Se ha reportado que el costo del pretratamiento y de la hidrólisis enzimática para la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica puede ser hasta cuatro veces mayor en comparación con la hidrólisis ácida. Asimismo, la inversión inicial en reactores enzimáticos puede ser hasta cinco veces más elevada que en sistemas de hidrólisis térmica o ácida [55]. En contraste, el método utilizado en este estudio destaca por su simplicidad, ya que no requiere reactivos adicionales ni tiempos de reacción prolongados. Además, en comparación con estudios como el de Corona et al. (2020), que alcanzaron concentraciones menores de azúcares a pesar de operar a altas temperaturas y presión controlada, este trabajo demuestra que es posible obtener mayores rendimientos con un proceso menos exigente en cuanto a materiales de entrada y control de variables [39]. Tsouko et al. (2020) reportaron hasta 49 g/L de glucosa y 16 g/L de xilosa utilizando 1.5 % de ácido sulfúrico a 121 °C, seguido de hidrólisis enzimática. Aunque estos resultados son comparables con los obtenidos en este estudio, su proceso incluye más etapas, un mayor consumo energético y, como señalan los mismos autores, problemas relacionados con la alta viscosidad del hidrolizado, lo cual complica operaciones posteriores como la

fermentación. En contraste, el método propuesto alcanzó concentraciones competitivas de azúcares empleando 0 % de H₂SO₄ y bajo condiciones de temperatura similares [68].

Procesos como el uso de CO₂ supercrítico son los que reportan los mayores rendimientos en la producción de glucosa y xilosa a partir de OP, alcanzando hasta 79.29 g/L y 97.14 g/L de glucosa y xilosa, respectivamente [82]. Cuando se aplica únicamente hidrólisis ácida a 130 °C, es posible obtener hasta 40.2 g/L de xilosa de OP [83]. Sin embargo, la combinación de alta presión y temperatura impacta negativamente la producción de xilosa. Cuando la temperatura supera los 160 °C bajo alta presión, el rendimiento disminuye significativamente, con apenas 2.3 g/L de xilosa producidos [76]. La realización de hidrólisis utilizando bacterias como *Enterobacter cloacae*, *Pseudomonas aeruginosa* o *Bacillus cereus* genera únicamente hasta 1.75 g/L de glucosa [84].

Diversos estudios sobre la hidrólisis de BSG muestran variaciones en los rendimientos de glucosa y xilosa, principalmente influenciadas por las condiciones metodológicas. Liguori et al. (2015) emplearon hidrólisis enzimática, logrando una alta conversión de celulosa a glucosa, lo cual subraya la efectividad de las enzimas en la degradación de polisacáridos. Sin embargo, este método implica mayores costos debido a la necesidad de enzimas específicas y condiciones de reacción controladas [85]. López-Linares et al. (2020) y Mussatto y Roberto (2006) optaron por la hidrólisis ácida, aplicando diferentes concentraciones de ácido sulfúrico junto con condiciones variables de temperatura y tiempo. Este método ha demostrado ser eficiente para la liberación de xilosa, aunque la producción de glucosa resulta más limitada en comparación con los procesos enzimáticos [86, 87]. Por su parte, García et al. (2023) combinaron hidrólisis ácida y enzimática en un proceso de fraccionamiento de BSG, lo que mejoró el aprovechamiento de los componentes de la biomasa, pero a costa de una mayor complejidad técnica y la necesidad de múltiples etapas de tratamiento [88].

En contraste, Treichel et al. (2023) investigaron el uso de biocatalizadores, así como catalizadores homogéneos y heterogéneos, para mejorar la conversión de azúcares. Este enfoque resulta prometedor, aunque enfrenta desafíos relacionados con la estabilidad y el costo de los catalizadores empleados [79]. La técnica de CO₂ supercrítico aplicada al BSG no ha demostrado ser efectiva, como evidenciaron Lisci et al. (2024), quienes reportaron concentraciones máximas de 8.5 g/L de glucosa y 9 g/L de xilosa. Esto resalta una ventaja clave de la hidrólisis frente a la extracción con CO₂ supercrítico, ya que esta última requiere presiones superiores a 73 atm, lo que implica un elevado consumo energético, la necesidad de equipos altamente especializados y condiciones de operación costosas que limitan su implementación a gran escala [82]. De manera similar, Vičević et al. (2024) mostraron que el uso de *T. lanuginosus* no genera una conversión significativa de glucosa y xilosa a partir de BSG [80]. No obstante, al operar a temperaturas elevadas por encima de 180 °C se alcanzaron hasta 18.3 g/L de glucosa y 7.9 g/L de xilosa. La enzima Celluclast, cuando se emplea en BSG, produce concentraciones de glucosa comparables a las reportadas en el presente estudio, con

valores que oscilan entre 7.24 y 26.55 g/L. Sin embargo, este no fue el caso de la xilosa, cuyo máximo rendimiento fue únicamente de 1.22 g/L.

En contraste con los estudios descritos en esta sección, el presente trabajo se basa únicamente en hidrólisis ácida en ausencia de enzimas, biocatalizadores o CO₂ supercrítico. Si bien los rendimientos de glucosa y xilosa son menores en comparación con estudios que emplean metodologías más complejas, la posibilidad de lograr una liberación significativa de azúcares en OP bajo hidrólisis al 0 % de ácido sulfúrico, junto con la simplicidad general del proceso de ácido diluido, hacen que esta estrategia resulte más atractiva para su escalamiento industrial.

3.2. Producción de bioetanol

La Figura 21 ilustra el incremento en la concentración de alcohol (% v/v) producido durante la fermentación a 28, 30 y 32 °C, mostrando en la Figura 21A los resultados para OP y en la Figura 21B los obtenidos para BSG, ambos durante un periodo de cinco días. Cada punto de datos corresponde al promedio de experimentos realizados por triplicado. Los resultados evidencian un aumento general en la producción de alcohol a todas las temperaturas evaluadas, sin cambios significativos después del tercer día de fermentación. La fermentación a 30 °C fue la más eficiente, alcanzando 5.25 % y 1.5 % de alcohol al finalizar el quinto día para OP y BSG, respectivamente. En contraste, el menor rendimiento (4.75 %) se observó a 28 °C, mientras que a 32 °C la producción alcanzó 5 %, lo que sugiere que temperaturas superiores a 30 °C afectan de manera negativa el proceso fermentativo, probablemente debido al estrés térmico sobre la levadura. La fermentación se detuvo en el día 5 porque la curva entró en meseta: a partir del día 3 la pendiente fue mínima. Esto es consistente con el agotamiento de sustrato fermentable y la inhibición por etanol (además de posibles inhibidores propios de OP/BSG), por lo que extender el tiempo solo aportaría ganancias marginales y mayores riesgos/costos operativos [80].

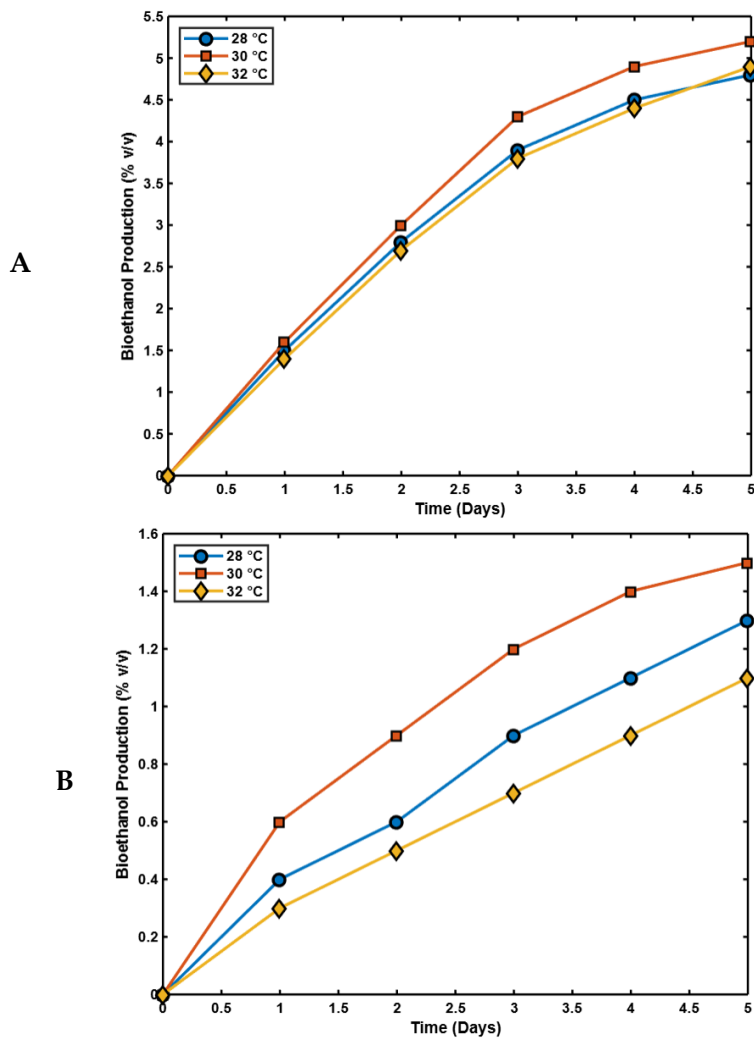


Figura 21. Producción de bioetanol a partir de OP (A) y BSG (B) a diferentes temperaturas.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que establecen un rango óptimo de temperatura para el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*, donde las desviaciones de dicho rango afectan tanto la velocidad de fermentación como la producción de alcohol [90]. La producción de bioetanol en función del tiempo se expresa mediante las ecuaciones 10 y 11, representan la cinética de fermentación para la

producción de bioetanol a partir de OP y BSG, con coeficientes de correlación de 0.9877 y 0.9670, respectivamente.

Comentado [AA3]: Error en numeración si se refiere a la 10

$$C_{OPbioethanol}(t) = \frac{5.15}{(1 + e^{-1.40(t-1.75)})} \quad (10)$$

$$C_{BSGbioethanol}(t) = \frac{1.47}{(1 + e^{-1.27(t-1.60)})} \quad (11)$$

En este caso, $C_{bioetanol}$ se refiere a la concentración de bioetanol en función del residuo de biomasa utilizado (% v/v), y t corresponde al tiempo en días.

La producción de bioetanol a partir de OP alcanzó 41.4 g/L, lo cual se comparó con los rendimientos reportados en otros estudios. El rango de producción de bioetanol a partir de OP varía entre 3.90 y 54.00 g/L [74, 75, 89, 91]. En el método utilizado por Corona et al. (2020), se lograron concentraciones de etanol de aproximadamente 35–38 g/L utilizando hidrolizados de OP fermentados con una cepa recombinante de *Escherichia coli* capaz de fermentar tanto azúcares hexosa como pentosa [58].

Por otra parte, Patsalou (2020) reportó un rendimiento final de etanol de 30.3 g/L utilizando hidrolizados obtenidos mediante pretratamiento secuencial ácido y enzimático. La fermentación se llevó a cabo con *Saccharomyces cerevisiae* y *Mucor indicus* [70]. Koutinas et al. (2015) realizaron un estudio sobre la fermentación alcohólica a alta temperatura de OP hidrolizado, encontrando que la levadura maximizó la producción de etanol a 42 °C, alcanzando 54 g/L. Además, exploraron el efecto del aceite esencial de OP sobre la formación de bioetanol y determinaron que la concentración mínima inhibitoria de dicho aceite fue de 0.01 % (v/v) [73].

Oberoi et al. (2010) reportaron un rendimiento de 50.55 g/L utilizando un proceso de hidrólisis ácida en dos etapas. En contraste, Santi et al. (2014) lograron una producción de etanol de 15 g/L al realizar un pretratamiento ácido de residuos cítricos en un innovador reactor de inyección de vapor a 180 °C durante 150 segundos, seguido de fermentación con una cepa industrial de *S. cerevisiae*. Este análisis indica que los rendimientos de bioetanol a partir de OP pueden ser significativamente más altos en comparación con estudios previos [71].

La máxima cantidad de bioetanol producida fue de 54.00 g/L mediante el uso de la levadura *Pichia kudriavzevii* [44]. Otros estudios destacan la influencia del tiempo de fermentación, señalando que a 24, 48 y 72 h la producción de bioetanol aumentó en un rango de 3.90–12.80 g/L [56, 69].

En el caso del BSG, la producción de bioetanol alcanzó 11.8 g/L, lo cual se comparó con los rendimientos reportados en la literatura, que varían entre 4 y 280 g/L [33, 48, 49, 58]. La máxima producción de bioetanol a partir de BSG fue de 280.00 g/L, obtenida mediante la combinación de BSG con caña de azúcar [69], lo cual se explica por el contenido

adicional de azúcares aportados por la caña. El BSG por sí solo puede alcanzar un máximo de 32.8 g/L utilizando la enzima *Ethanol Red* [66]. Por otro lado, la aplicación de CO₂ supercrítico durante 24 h de operación alcanzó una concentración de bioetanol de apenas 4 g/L [63].

En términos generales, la producción de bioetanol a partir de BSG resultó menor en comparación con OP. Dado que el BSG ha sido sometido previamente a un proceso de fermentación para la elaboración de cerveza, es de esperarse que el bioetanol obtenido sea inferior.

3.3. Proyección de bioetanol a partir de OP y BSG

La industria mexicana genera aproximadamente 720,000 toneladas de OP anualmente, de las cuales se estima que el 80 % es recuperable, lo que equivale a 576,000 toneladas disponibles. Con un rendimiento experimental de 2.52 mL de etanol por cada 100 g de OP, el potencial de producción se estima en alrededor de 14.51 millones de litros de etanol por año. Por otro lado, la industria cervecera mexicana produce aproximadamente 2.48 millones de toneladas de BSG húmedo anualmente. Con un rendimiento de 1.78 mL de etanol por cada 100 g de BSG húmedo, el potencial de producción asciende a 44.14 millones de litros de etanol al año. No obstante, considerando las pérdidas logísticas y de procesamiento, se estima que solo el 80 % del BSG es utilizable, reduciendo el potencial de producción a 35.31 millones de litros de etanol anuales [33, 47].

Al combinar ambos residuos, el potencial total de producción de bioetanol alcanza los 49.82 millones de litros anuales. Este volumen representa aproximadamente el 31 % de la producción total de etanol en México durante 2023, como se muestra en la Figura 22. En consecuencia, la valorización de OP y BSG para la producción de bioetanol podría reducir de manera significativa la dependencia de importaciones y fortalecer la autosuficiencia energética del país.

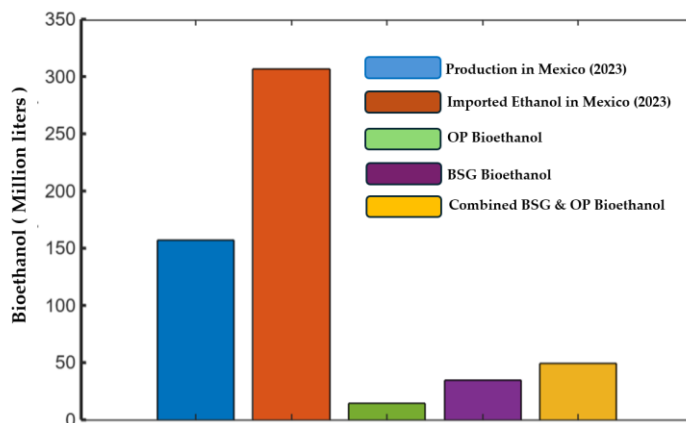


Figura 22. Producción y demanda de bioetanol en México en comparación con el potencial de los residuos agroindustriales.

El volumen de bioetanol obtenido representa una fuente significativa de energía renovable que podría contribuir a los objetivos de sostenibilidad de México y reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

Este estudio resalta el potencial de la OP y el BSG como materias primas viables para la producción de bioetanol mediante hidrólisis ácida, seguida de fermentación alcohólica con *Saccharomyces cerevisiae*. El proceso fue optimizado con el fin de incrementar el rendimiento de azúcares fermentables (glucosa y xilosa), al mismo tiempo que se redujo el consumo de insumos químicos y de energía.

En el caso de OP, los resultados muestran que el pretratamiento a 125 °C durante 1 h con 0.0 % de H₂SO₄ alcanzó concentraciones de 39.64 g/L de glucosa y 12.33 g/L de xilosa. El análisis ANOVA reveló que la temperatura fue el factor más influyente en la hidrólisis, mientras que la concentración de ácido sulfúrico, aunque estadísticamente significativa, no generó un incremento sustancial en la producción de glucosa o xilosa. Esto sugiere que la reducción de la concentración ácida podría ser una estrategia viable para disminuir los costos operativos y el impacto ambiental.

Para el BSG, las condiciones óptimas fueron 2.5 % de H₂SO₄ a 160 °C durante 20 min, obteniéndose concentraciones de 25.08 g/L de glucosa y 12.21 g/L de xilosa. No obstante, al reducir la temperatura a 130 °C se observó una disminución del 13.6 % en el rendimiento de glucosa y del 14.3 % en xilosa, acompañada de una reducción del 28.6 % en el consumo energético. Esto subraya la importancia de evaluar el equilibrio entre la eficiencia de producción y el consumo de energía al diseñar procesos a gran escala.

La fermentación con *S. cerevisiae* resultó en una concentración máxima de etanol de 5.25 % v/v para OP y de 1.5 % v/v para BSG a 30 °C. El modelado cinético de la fermentación mediante ecuaciones logísticas arrojó coeficientes de correlación superiores a 0.98, lo que indica un alto grado de predictibilidad en la producción de etanol. La eficiencia de conversión de azúcares a etanol fue mayor para OP, lo que sugiere que este sustrato es más adecuado para procesos fermentativos en comparación con BSG, probablemente debido a su menor contenido de lignina.

Con base en los rendimientos obtenidos en este estudio, se estima que el potencial de producción de bioetanol en México asciende a 49.82 millones de litros por año, equivalente al 31 % de la producción nacional de etanol en 2023. Esta cantidad representa además el 20.8 % de la capacidad instalada de FS Bioenergía, una de las principales plantas brasileñas productoras de etanol a partir de maíz, con una capacidad anual de 240 millones de litros [92]. En América Latina, Colombia opera 14 plantas de etanol con una producción total de 414.71 millones de litros anuales, lo que equivale a un promedio de 29.62 millones de litros por planta. Por lo tanto, la producción estimada en este estudio supera en un 68.2 % el promedio colombiano [93], lo que subraya el alto

potencial de la conversión de residuos agroindustriales en una fuente de energía sostenible dentro del contexto regional de los biocombustibles.

4. CONCLUSIONES

Con base en la disponibilidad de residuos agroindustriales en Mexicali, Baja California, se modeló y evaluó un esquema de revalorización de cáscara de naranja, hojas de eucalipto y bagazo cervecero que integra la extracción de aceites esenciales, asistida por energía solar, a partir de cáscara de naranja y hojas de eucalipto, y el aprovechamiento de la fracción azucarada de la cáscara de naranja y del bagazo cervecero para la producción de bioetanol. La simulación conjunta en Aspen Plus® y TRNSYS con 25 colectores y un área de captación de 110 m² permitió alcanzar temperaturas de 75–85 °C y reducir en promedio 10 % la energía de caldera del proceso de eucalipto. La tasa de ahorro energético específica fue de 0.0909 % por m². Bajo estas condiciones, los rendimientos modelados fueron de 0.02175 L/kg de aceite esencial de naranja y de 0.056 L/kg de aceite esencial de eucalipto. El índice total de energía del proceso de eucalipto con integración solar fue de 521 kWh/L.

De forma complementaria, la hidrólisis de cáscara de naranja a 125 °C con 0.5 % de H₂SO₄ liberó 52.14 g/L de glucosa y 15.70 g/L de xilosa, y bajo las mismas condiciones sin ácido se obtuvieron 48.43 g/L de glucosa y 13.79 g/L de xilosa, equivalentes a 92.9 % y 87.8 % del tratamiento ácido. En bagazo cervecero, 160 °C produjo 27.10 g/L de glucosa y 14.22 g/L de xilosa, mientras que a 130 °C se lograron 25.10 g/L y 11.00 g/L, equivalentes a 92.6 % y 77.4 % del máximo con menor demanda energética. La fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* a 30 °C alcanzó 5.25 % v/v de bioetanol en la corriente de cáscara de naranja con 41.4 g/L y 1.5 % v/v en bagazo cervecero con 11.8 g/L. Los modelos cinéticos mostraron R² mayor que 0.98. En conjunto, los resultados confirman la viabilidad técnica y energética de un esquema de economía circular escalable a la disponibilidad regional de residuos, capaz de co-producir aceites esenciales y bioetanol con menor consumo de energía e insumos químicos y con métricas claras de rendimiento y eficiencia.

El trabajo cumplió los objetivos planteados diseñar y simular un proceso integrado que combine la extracción de aceites esenciales con integración de energía solar y evaluar experimentalmente la producción de bioetanol mediante hidrólisis ácida y fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*. En conjunto, se demostró el aprovechamiento técnico de la biomasa disponible en Mexicali, la reducción del consumo energético y de insumos químicos, y la viabilidad de estos residuos dentro de un marco de economía circular, ofreciendo una perspectiva de revalorización alineada con las necesidades regionales.

La integración solar en la línea de aceites esenciales mostró beneficios térmicos medibles y operables. La simulación conjunta en Aspen Plus® y TRNSYS con 25 colectores y un área de captación de 110 m² permitió alcanzar temperaturas de 75 a 85 °C y reducir en promedio diez por ciento la energía de caldera en el proceso de eucalipto, con una tasa de ahorro energético específica de 0.0909% por m². Bajo estas condiciones,

los rendimientos modelados fueron de 0.02175 L/kg de aceite esencial de naranja y 0.056 L/kg de aceite esencial de eucalipto, y el índice total de energía del proceso de eucalipto con integración solar fue de 521 kWh/L.

En complemento a la simulación, se llevaron a cabo hidrólisis ácida y fermentación a escala laboratorio. En la línea de azúcares y bioetanol, la hidrólisis de cáscara de naranja a 125 °C con 0.5 % de ácido sulfúrico liberó 52.14 g/L de glucosa y 15.70 g/L de xilosa; bajo las mismas condiciones sin ácido se obtuvieron 48.43 y 13.79 g/L, equivalentes a 92.9 y 87.8 % del tratamiento ácido. En bagazo cervecero, 160 °C produjo 27.10 g/L de glucosa y 14.22 de xilosa, mientras que a 130 °C se lograron 25.10 y 11.00 g/L, equivalentes a 92.6 y 77.4 % del máximo con menor demanda energética.

La fase fermentativa confirmó la conversión de los hidrolizados en bioetanol bajo condiciones moderadas. A 30 °C con *Saccharomyces cerevisiae* se alcanzaron 5.25 % v/v y 41.4 g/L en la corriente de cáscara de naranja, y 1.5 % v/v y 11.8 g/L en bagazo cervecero. La respuesta observada reflejó el contenido de azúcares disponible, la composición de cada hidrolizado y la presencia potencial de compuestos inhibidores propios de cada materia prima. Los modelos cinéticos ajustados describieron adecuadamente la evolución temporal de sustratos y producto con coeficientes de determinación mayores a 0.98.

En el escalamiento se presentan desafíos operativos y de gestión que deben considerarse desde el diseño: variabilidad composicional de la biomasa por estacionalidad y pretratamientos, almacenamiento, logística y transporte, operación del campo solar, presencia de inhibidores en los hidrolizados, compatibilidad de materiales para minimizar corrosión y asegurar integridad de equipos, e integración de calor, entre otras. Dentro de los hallazgos más importantes del presente trabajo es destacar que los resultados obtenidos con hidrólisis sin ácido son competitivos frente a lo reportado en la literatura y favorecen la mitigación de corrosión, los costos de mantenimiento y el consumo de insumos químicos, mientras que las temperaturas moderadas alcanzadas, inferiores a las comúnmente informadas, reducen requerimientos energéticos; todo ello constituye un índice de confiabilidad para extrapolar a una mejor escalabilidad de laboratorio a piloto con bases cuantitativas sólidas.

En síntesis, el sistema propuesto demuestra viabilidad técnica y energética para Mexicali al producir de manera conjunta aceites esenciales y bioetanol con menor consumo de energía e insumos químicos y con valores de rendimiento reproducibles. Como continuidad se recomienda optimizar la integración solar y su control estacional, fortalecer la fermentación con estrategias de nutrición y cofermentación de hexosas y pentosas, y llevar a cabo una validación piloto con balances reales de masa y energía junto con análisis tecnoeconómicos. Con estas acciones, la valorización integrada de cáscara de naranja, hojas de eucalipto y bagazo cervecero se perfila como una ruta escalable para transitar hacia una economía regional circular y eficiente.

REFERENCIAS

1. N. Mahato, K. Sharma, R. Koteswararao, M. Sinha, E. Baral, M. H. Cho, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2019, 59 (4), 611–625. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1384716>
2. M. Vincekovic, M. Viskic, S. Juric, J. Giacometti, D. B. Kovac̃evic, P. Putnik, A. R. Jambrak, *Trends Food Sci. Technol.* 2017, 69, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.001>
3. I. John, K. Muthukumar, A. Arunagiri, *Int. J. Green Energy* 2017, 14 (7), 599–612. DOI: <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1307753>
4. A. K. Dhakad, V. V. Pandey, S. Beg, J. M. Rawat, A. Singh, *J. Sci. Food Agric.* 2018, 98 (3), 833–848. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8600>
5. B. Salehi, J. Sharifi-Rad, C. Quispe, H. Llaique, M. Villalobos, A. Smeriglio, D. Trombetta, S. M. Ezzat, M. A. Salem, A. Zayed, *Trends Food Sci. Technol.* 2019, 91, 609–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.003>
6. R. Kant, A. Kumar, *Sustainable Chem. Pharm.* 2022, 30, 100829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100829>
7. L. A. Conde-Hernández, J. R. Espinosa-Victoria, A. Trejo, J. A. Guerrero-Beltrán, *J. Food Eng.* 2017, 200, 81–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.022>
8. M. Vinatoru, T. J. Mason, I. Calinescu, *Trends Anal. Chem.* 2017, 97, 159–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.002>
9. R. Kant, A. Kumar, *J. Food Process Eng.* 2023, 46 (2), e14228. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14228>
10. Q. W. Zhang, L. G. Lin, W. C. Ye, *Chin. Med.* 2018, 13 (1), 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13020-018-0177-x>
11. K. Tangsriwong, Modeling of chemical processes using commercial and open-source software: A comparison between Aspen Plus and DWSIM, in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental*, IOP Publishing, Bangkok, Thailand, March 2020.
12. K. I. Al-Malah, *Aspen Plus: Chemical Engineering Applications*, John Wiley & Sons, New York 2016.
13. M. Compton, B. Rezaie, *Sustainable Cities Soc.* 2018, 43, 86–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.032>
14. K. Ezzarrouqy, A. Hejjaj, A. Idlimam, F. A. Nouh, L. Mandi, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022, 29 (17), 25709–25722. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17612-1>

15. A. D. Nannaware, C. S. Chanotiya, P. K. Rout, P. Singh, India IN201811014120, 2019
16. Hoang, T.-D.; Nghiem, N. Recent Developments and Current Status of Commercial Production of Fuel Ethanol. *Fermentation* 2021, 7(4), 314. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040314>
17. Yelle, D.J.; Serwańska, K. Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass—Challenges and Solutions. *Molecules* 2022, 27(24), 8717. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
18. Goldemberg, J.; Coelho, S.T.; Guardabassi, P. The Sustainability of Ethanol Production from Sugarcane. *Energy Policy* 2008, 36(6), 2086–2097. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.028>
19. Friedlingstein, P.; O’Sullivan, M.; Jones, M.W.; Andrew, R.M.; Gregor, L.; Hauck, J.; et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* 2022, 14, 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
20. International Energy Agency (IEA). Transport Biofuels – Renewables 2023; IEA: Paris, France, 2024. Available online: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/transport-biofuels> (accessed on 11 August 2025).
21. Smith, P.; Johnson, F.X.; Marelli, L.; Chum, H.; Elbehri, A. Bioethanol in the Global Energy Mix: Benefits and Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2023, 180, 113–154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113154>
22. Ulep, R.A.; Madigal, J.P.T.; Suarez, T.C.E.; Ramos, K.M.D.; Cariaga, J.F.; Agrupis, S.C. “Nipahol”: A Locally Formulated Sanitizer/Disinfectant from Nipa Bioethanol for Possible Use Against COVID-19. *Agro Bali: Agricultural Journal* 2021, 5(1), 30–41. <https://doi.org/10.37637/ab.v5i1.839>
23. Castro, L.A.d.; Lizi, J.M.; Chagas, E.G.L.d.; Carvalho, R.A.d.; Vanin, F.M. From Orange Juice By-Product in the Food Industry to a Functional Ingredient: Application in the Circular Economy. *Foods* 2020, 9(5), 593. <https://doi.org/10.3390/foods9050593>
24. Munir, H.; Yaqoob, S.; Awan, K.A.; Imtiaz, A.; Naveed, H.; Ahmad, N.; Naeem, M.; Sultan, W.; Ma, Y. Unveiling the Chemistry of Citrus Peel: Insights into Nutraceutical Potential and Therapeutic Applications. *Foods* 2024, 13(11), 1681. <https://doi.org/10.3390/foods13111681>
25. Zeko-Pivač, A.; Tišma, M.; Žnidaršič-Plazl, P.; Kulisic, B.; Sakellaris, G.; Hao, J.; Planinić, M. The Potential of Brewer’s Spent Grain in the Circular Bioeconomy: State of the Art and Future Perspectives. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2022, 10, 870744. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.870744>
26. Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
27. U.S. Department of Agriculture (USDA). Global orange production will total 48.8 million tons in the 2023–2024 season. *Citrus Committee*, 2024. Available online: <https://www.comitedecitricos.cl/noticias-y-actividades/noticias/1570-usda-produccion-mundial-de-naranja-totalizara-48-8-millones-de-toneladas-en-campana-2023-2024> (accessed on 8 December 2024).

28. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México. Detrás de la naranja. *Gobierno de México*, 2024. Available online: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/detras-de-la-naranja?idiom=es> (accessed on 8 December 2024).
29. Moreno Camarena, A. Caracterización Físicoquímica e Hidrólisis del Bagazo Cervecerero para la Obtención de Azúcares Reductores. Master's Thesis, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México, 2017. Available online: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/handle/20.500.12930/1891> (accessed on 8 December 2024).
30. Devnani, B.; Moran, G.C.; Grossmann, L. Extraction, Composition, Functionality, and Utilization of Brewer's Spent Grain Protein in Food Formulations. *Foods* 2023, 12(7), 1543. <https://doi.org/10.3390/foods12071543>
31. Reddy, N.; Yang, Y. Properties and Potential Applications of Natural Cellulose Fibers from Orange Peel Waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2005, 53(26), 10368–10375. <https://doi.org/10.1021/jf052127g>
32. Tardiolo, G.; Nicolò, M.S.; Drago, C.; Genovese, C.; Fava, G.; Gugliandolo, C.; D'Antona, N. Orange Peel Waste as Feedstock for the Production of Glycerol-Free Biodiesel by the Microalgae *Nannochloropsis oculata*. *Molecules* 2023, 28(19), 6846. <https://doi.org/10.3390/molecules28196846>
33. Sganzerla, W.G.; Buller, L.S.; Mussatto, S.I.; Forster-Carneiro, T. Techno-Economic Assessment of Bioenergy and Fertilizer Production by Anaerobic Digestion of Brewer's Spent Grains in a Biorefinery Concept. *Journal of Cleaner Production* 2021, 297, 126600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126600>
34. Bai, F.W.; Anderson, W.A.; Moo-Young, M. Ethanol Fermentation Technologies from Sugar and Starch Feedstocks. *Biotechnology Advances* 2008, 26(1), 89–105. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.09.002>
35. Gomes, J.; Batra, J.; Chopda, V.R.; Kathiresan, P.; Rathore, A.S. Monitoring and Control of Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass. In *Waste Biorefinery: Potential and Perspectives*; Elsevier: 2018; pp. 727–749. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00025-2>
36. Paz, A.; et al. Enzymatic Hydrolysis of Brewer's Spent Grain to Obtain Fermentable Sugars. *Bioresource Technology* 2019, 275, 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.068>
37. Xavier, A.M.R.B.; Beltrán, S.; Sanz, M.T. Subcritical Water as Pretreatment Technique for Bioethanol Production from Brewer's Spent Grain within a Biorefinery Concept. *Polymers* 2022, 14(23), 5218. <https://doi.org/10.3390/polym14235218>
38. FAO. Waste Management Options and Climate Change. 2020. Available online: <https://www.fao.org> (accessed on 11 August 2025).
39. CICY. Las cáscaras de naranja: más que un desecho. Centro de Investigación Científica de Yucatán. 2023. Available online: https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2023/2023-08-17-ROrtiz-Las-cascaras-de-naranja.pdf (accessed on 11 August 2025).
40. Intedya. ¿Cuál es el impacto ambiental de los residuos de la industria cervecera? 2021. Available online:

- <https://www.intedya.com/internacional/4038/noticia-cual-es-el-impacto-ambiental-de-los-residuos-de-la-industria-cervecera.html> (accessed on 11 August 2025).
41. Kumar, P.; Barrett, D.M.; Delwiche, M.J.; Stroeve, P. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, *48*(8), 3713–3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>
 42. Alvira, P.; Tomás-Pejó, E.; Ballesteros, M.; Negro, M.J. Pretreatment Technologies for an Efficient Bioethanol Production Process Based on Enzymatic Hydrolysis: A Review. *Bioresour. Technol.* 2010, *101*(13), 4851–4861. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>
 43. Mosier, N.; Wyman, C.; Dale, B.; Elander, R.; Lee, Y.Y.; Holtzapple, M.; Ladisch, M. Features of Promising Technologies for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Bioresour. Technol.* 2005, *96*(6), 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
 44. Mood, S.H.; Golfeshan, A.H.; Tabatabaei, M.; Jouzani, G.S.; Najafi, G.H.; Gholami, M.; Ardjmand, M. Lignocellulosic Biomass to Bioethanol, a Comprehensive Review with a Focus on Pretreatment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, *27*, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>
 45. Sun, Y.; Cheng, J. Hydrolysis of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production: A Review. *Bioresour. Technol.* 2002, *83*(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7)
 46. Olofsson, K.; Bertilsson, M.; Lidén, G. A Short Review on SSF – An Interesting Process Option for Ethanol Production from Lignocellulosic Feedstocks. *Biotechnol. Biofuels* 2008, *1*, 7. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-1-7>
 47. Klein-Marcuschamer, D.; Oleskowicz-Popiel, P.; Simmons, B.A.; Blanch, H.W. Technoeconomic Analysis of Biofuel Production. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* 2010, *4*(6), 672–687. <https://doi.org/10.1002/bbb.229>
 48. Chandel, A.K.; Garlapati, V.K.; Singh, A.K.; Antunes, F.A.F.; da Silva, S.S. The Path Forward for Lignocellulose Biorefineries: Bottlenecks, Solutions, and Perspective on Commercialization. *Bioresour. Technol.* 2018, *264*, 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.004>
 49. Jeffries, T.W.; Jin, Y.S. Metabolic Engineering for Improved Fermentation of Pentoses by Yeasts. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2004, *63*(5), 495–509. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1450-0>
 50. Lin, Y.; Zhang, W.; Li, C.; Sakakibara, K.; Tanaka, S.; Kong, H. Factors Affecting Ethanol Fermentation Using *Saccharomyces cerevisiae* BY4742. *Biomass Bioenergy* 2012, *47*, 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.019>
 51. Stanley, D.; Bandara, A.; Fraser, S.; Chambers, P.J.; Stanley, G.A. The Ethanol Stress Response and Ethanol Tolerance of *Saccharomyces cerevisiae*. *J. Appl. Microbiol.* 2010, *109*(1), 13–24. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04657.x>
 52. Dien, B.S.; Cotta, M.A.; Jeffries, T.W. Bacteria Engineered for Fuel Ethanol Production: Current Status. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2003, *63*, 258–266. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1449-9>
 53. Rogers, P.L.; Jeon, Y.J.; Lee, K.J.; Lawford, H.G. *Zymomonas mobilis* for Fuel Ethanol and Higher Value Products. *Advances in Biochemical*

- Engineering/Biotechnology* 2007, 108, 263–288.
https://doi.org/10.1007/10_2007_060
54. Walker, G.M.; Stewart, G.G. *Saccharomyces cerevisiae* in the Production of Fermented Beverages. *Beverages* 2016, 2(4), 30.
<https://doi.org/10.3390/beverages2040030>
 55. Gurdo, N. Mejoramiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* Y138 por ingeniería evolutiva para la producción de bioetanol de segunda generación. Bachelor's Thesis, Universidad Nacional de General San Martín, San Martín, Argentina, 2016. Available online:
https://www.researchgate.net/publication/303234696_Mejoramiento_de_la_levadura_Saccharomyces_cerevisiae_Y138_por_ingenieria_evolutiva_para_la_produccion_de_bioetanol_de_segunda_generacion (accessed on 11 August 2025).
 56. Himmel, M.E.; Ding, S.Y.; Johnson, D.K.; Adney, W.S.; Nimlos, M.R.; Brady, J.W.; Foust, T.D. Biomass Recalcitrance: Engineering Plants and Enzymes for
 57. J. Bustamante, S. Van Stempvoort, M. García-Gallarreta, J. A. Houghton, H. K. Briers, V. L. Budarin, J. H. Clark, J. Cleaner Prod. 2016, 137, 598–605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.108>
 58. M. Romdhane, H. Bendaoud, E. Saadaoui, W. Elfalleh, AJMAP 2019, 5 (3), 35–46. DOI: <https://doi.org/10.48347/IMIST.PRSM/ajmap-v5i3.18666>
 59. M. Ortiz-Sanchez, J. C. Solarte-Toro, C. E. Orrego-Alzate, C. D. Acosta-Medina, C. A. Cardona-Alzate, Biomass Convers. Biorefin. 2021, 11 (2), 645–659. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00627-y>
 60. J. Ayala, G. Montero, H. Campbell, C. Sagaste, M. Coronado, A. Vázquez, Modelado para la extracción de aceites esenciales, con limoneno y 1,8-cineol como productos refinados, Acad. Mex. Inves y Doc Ing Quim. 8 de Mayo del 2015.
 61. Sistema de información agroalimentaria y pesquera (SIAP)
<https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
(Accessed on June 20, 2021)
 62. VORTEX <https://vortexfdc.com/tmy-data> (Accessed on June 20, 2021)
 63. Armenta, E.E.; Coronado, M.A.; Ayala, J.R.; León, J.A.; Montes, D. Essential Oil Extraction for All: A Flexible and Modular System for Citrus Biomass Waste. *BioResources* 2023, 18(3), 4977–4993.
<https://doi.org/10.15376/biores.18.3.4977-4993>
 64. Ulep, R.A.; Madigal, J.P.T.; Suarez, T.C.E.; Ramos, K.M.D.; Cariaga, J.F.; Agrupis, S.C. “Nipahol”: A Locally Formulated Sanitizer/Disinfectant from Nipa Bioethanol for Possible Use Against COVID-19. *Agro Bali: Agricultural Journal* 2021, 5(1), 30–41. <https://doi.org/10.37637/ab.v5i1.839>
 65. Deshavath, N.N.; Mukherjee, G.; Goud, V.V.; Veeranki, V.D.; Sastri, C.V. Pitfalls in the 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) assay for the reducing sugars: Interference of furfural and 5-hydroxymethylfurfural. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020, 156, 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.045>
 66. Ayala, J. R.; Montero, G.; Coronado, M. A.; García, C.; Curiel-Alvarez, M. A.; León, J. A.; Sagaste, C. A.; Montes, D. G. Characterization of Orange Peel Waste and Valorization to Obtain Reducing Sugars. *Molecules* 2021, 26(5), 1348. <https://doi.org/10.3390/molecules26051348>.

67. Wu, Y.; Shen, X.; Yuan, Q.; Yan, Y. Metabolic Engineering Strategies for Co-Utilization of Carbon Sources in Microbes. *Bioengineering* 2016, 3(1), 10. <https://doi.org/10.3390/bioengineering3010010>
68. Tsouko, E.; Maina, S.; Ladakis, D.; Kookos, I.K.; Koutinas, A. Integrated biorefinery development for the extraction of value-added components and bacterial cellulose production from orange peel waste streams. *Renew. Energy* 2020, 160, 944–954. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.108>
69. Corona Vázquez, B.; Roa-Morales, G.; Natividad, R.; Balderas-Hernández, P.; Saucedo-Luna, J. Thermal Hydrolysis of Orange Peel and its Fermentation with Alginate Beads to Produce Ethanol. *BioResources* 2017, 12, 2955–2964. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.2955-2964>.
70. Patsalou, M.; Menikea, K.K.; Nikolaou, C.; Tsoukos, P.; Koutinas, A.; Koutinas, M. A Citrus Peel Waste Biorefinery for Ethanol and Methane Production. *Molecules* 2019, 24, 2451. <https://doi.org/10.3390/molecules24132451>
71. Oberoi, H.S.; Vadlani, P.V.; Madl, R.L. Production of Ethanol from Orange Peels: Fermentation Studies and Two-Stage Hydrolysis Using Optimized Parameters through Experimental Design. *J. Agric. Food Chem.* 2010, 58, 3422–3429. <https://doi.org/10.1021/jf903163t>.
72. Alonso-Riaño, P.; Amândio, M.S.T.; Xavier, A.M.R.B.; Beltrán, S.; Sanz, M.T. Subcritical Water as Pretreatment Technique for Bioethanol Production from Brewer's Spent Grain within a Biorefinery Concept. *Polymers* 2022, 14, 5218. <https://doi.org/10.3390/polym14235218>
73. Azevedo, A.R.; dos Santos, M.S.N.; Wancura, J.H.C.; Oro, C.E.D.; Pfeifenberg, R.; Zobot, G.L.; Tres, M.V. Semi-Continuous Subcritical Hydrolysis of Orange Waste Biomasses for Integrated Production of Fermentable Sugars and Platform Chemicals. *Chem. Eng. Process.* 2024, 197, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109719>
74. Kasaeian, A.; Fereidooni, L.; Ahmadbeigi, A.; Kahedi, S.; Shavali Koohshoori, M.; Ghafarian, S.; Tajmousavilangerudi, A.; Salaripoor, H. Review on Bioethanol Production from Fruit Peels. *Waste Biomass Valorization* 2025. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-02938-5>
75. Kowsalya, R.; Prabhu, N.; Rajamehala, M.; Singh, M.V.P.; Karthikadevi, S. Statistical Optimization of Cellulase Production and Its Efficacy in Hesperidin Extraction from Orange Peel and Bioethanol Production from Rice Straw by Simultaneous Saccharification and Fermentation. *Res. J. Biotechnol.* 2022, 17(8), 20–31.
76. Plugatar, Y.; Johnson, J.B.; Timofeev, R.; Korzin, V.; Kazak, A.; Nekhaychuk, D.; Borisova, E.; Rotanov, G. Prediction of Ethanol Content and Total Extract Using Densimetry and Refractometry. *Beverages* 2023, 9, 31. <https://doi.org/10.3390/beverages9020031>.
77. Galindo-Segura, L.A.; Pérez-Vázquez, A.; Ramírez-Martínez, A.; López-Romero, G.; Gómez-Merino, F.C. Managing Orange Bagasse in the Central Area of Veracruz State. *Terra Latinoam.* 2023, 41, e1673. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1673>

78. Nunes, L.J.R.; Silva, S. Optimization of the Residual Biomass Supply Chain: Process Characterization and Cost Analysis. *Logistics* 2023, 7, 48. <https://doi.org/10.3390/logistics7030048>
79. Cui, J.; Tan, J.; Deng, T.; Cui, X.; Zhu, Y.; Li, Y. Conversion of carbohydrates to furfural via selective cleavage of the carbon–carbon bond: The cooperative effects of zeolite and solvent. *Green Chem.* 2016, 18, 1619–1624. <https://doi.org/10.1039/C5GC01948F>.
80. Cortés Ortiz, W.G.; Ibla Gordillo, J.F.; Calderón Velásquez, L.M.; Herrera Bueno, A.F. Cuantificación de azúcares reductores en las cáscaras de naranja y banano. *Rev. Tecnol.* 2020, 12, 72–76. <https://doi.org/10.18270/rt.v12i2.772>
81. Kuo, C.-H.; Huang, C.-Y.; Shieh, C.; et al. Hydrolysis of Orange Peel with Cellulase and Pectinase to Produce Bacterial Cellulose using *Gluconacetobacter xylinus*. *Waste Biomass Valorization* 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0034-7>.
82. Lisci, S.; Tronci, S.; Grosso, M.; Hajrizaj, R.; Sibono, L.; Karring, H.; Gerganov, A.; Maschietti, M.; Errico, M. Valorizing Brewer's Spent Grain: A Sequential Pathway of Supercritical Extraction, Hydrolysis, and Fermentation. *Chem. Eng. Sci.* 2024, 285, 119620. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119620>
83. Pereira, B.S.; de Freitas, C.; Masarin, F.; Brienzo, M. Xylooligosaccharides from Industrial Fruit and Restaurant Waste Produced by Liquid Hot Water Treatment. *BioEnergy Res.* 2023, 16, 843–855. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10505-2>
84. Vinotha, T.; Umamaheswari, N.; Pandiyan, J.; Al-Ghanim, K.A.; Nicoletti, M.; Govindarajan, M. Biofuel Production from Mango and Orange Peel and Tapioca Shells by Fermentation Using Consortium of Bacteria: Agricultural and Food Waste Valorization. *Fermentation* 2023, 9, 678.
85. Liguori, R.; Soccol, C.R.; Vandenberghe, L.P.S.; Woiciechowski, A.L.; Faraco, V. Second Generation Ethanol Production from Brewers' Spent Grain. *Energies* 2015, 8, 2575–2586. <https://doi.org/10.3390/en8042575>.
86. López-Linares, J.C.; Romero-García, J.M.; Robles, E.; Esteban, J.; Feroso, J.; Castro, E. Brewer's Spent Grain as a Source of Renewable Fuel through Optimized Dilute Acid Pretreatment. *Renew. Energy* 2020, 146, 1971–1983. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.030>.
87. Mussatto, S.I.; Roberto, I.C. Chemical Characterization and Liberation of Pentose Sugars from Brewer's Spent Grain. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2006, 81, 268–274. <https://doi.org/10.1002/jctb.1374>
88. Garcia, M.; et al. Optimised Fractionation of Brewer's Spent Grain for a Biorefinery Producing Sugars, Oligosaccharides, and Bioethanol. *Processes* 2023, 11, 455. <https://doi.org/10.3390/pr11020455>
89. Vičević, R.; Božinović, M.; Zekić, N.; Novak, M.; Kučić Grgić, D.; Šalić, A.; Zelić, B. Development of a Two-Stage Bioprocess for the Production of Bioethanol from the Acid Hydrolysate of Brewer's Spent Grain. *Energies* 2024, 17, 3975. <https://doi.org/10.3390/en17163975>
90. Lewallen, L.; Loebeck, A.; Neighbors, D.; Wen, X.; Hoffman, R. The Effect Temperature Has on the Production of Carbon Dioxide in *Saccharomyces cerevisiae*. *J. Introductory Biol. Investig.* 2021, 14, 2. Available online:

<https://undergradsciencejournals.okstate.edu/index.php/jibi/article/view/13104>
(accessed on [March 19 2024]).

91. Sarkar, R.; Nain, L.; Dutta, A.; Kundu, A.; Saha, S. Unraveling the Utilization Feasibility of Citrus Peel Solid Distillation Waste as Potential Source for Antioxidant as well as Bioethanol. *Biomass Convers. Biorefin.* 2024, 14, 27379–27391. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03367-3>
92. WEG. FS Bioenergía es pionera en la producción de etanol de maíz en Brasil. WEG. 2018. Available online: <https://www.weg.net/institucional/ES/es/news/productos-y-soluciones/fs-bioenergia-es-pionera-en-la-produccion-de-etanol-de-maiz-en-brasil> (accessed on [March 16 2024]).
93. Biofuels Working Group (GTB) of ARIAE. *Statistical Benchmarking of Biofuels in Ibero-America 2023: Base Year 2022*; Ibero-American Association of Energy Regulatory Entities (ARIAE): Madrid, Spain, 2024.

Anexos

Otros productos académicos

- 1) Como parte de la evidencia del trabajo de investigación desarrollado, se presenta la publicación del artículo científico titulado “Hydrolysis Assessment of Orange Peel and Brewer’s Spent Grain for Bioethanol Production” en la revista internacional Processes (MDPI). En este trabajo se evaluó la producción de bioetanol a partir de cáscara de naranja y bagazo cervecero mediante hidrólisis ácida y fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*. El diseño factorial aplicado permitió analizar la influencia de la temperatura, la concentración de ácido y el tiempo de reacción en la liberación de azúcares fermentables. Los resultados más destacados mostraron que la hidrólisis de OP a 125 °C con 0.5% H₂SO₄ alcanzó concentraciones de 52.14 g/L de glucosa y 15.70 g/L de xilosa, mientras que para BSG se obtuvieron 27.10 g/L de glucosa y 14.22 g/L de xilosa bajo condiciones de 2.5% H₂SO₄ a 160 °C. La fermentación a 30 °C produjo hasta 5.25% v/v de bioetanol en OP y 1.5% v/v en BSG, correspondientes a 41.4 g/L y 11.8 g/L, respectivamente. Estos resultados, respaldados por modelos cinéticos con alta capacidad predictiva (R² > 0.98), confirman el potencial de OP y BSG como sustratos viables para la producción de bioetanol bajo condiciones de procesamiento moderadas.

Article

Hydrolysis Assessment of Orange Peel and Brewer's Spent Grain for Bioethanol Production

Jesús M. Armenta ¹, Edson E. Armenta ¹, José R. Ayala ^{1,*}, Marcos A. Coronado ^{1,*}, Daniela G. Montes ¹ and Lisandra Quintana ²

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, Mexicali 21280, Baja California, Mexico; a1174515@uabc.edu.mx (J.M.A.); edson.armenta@uabc.edu.mx (E.E.A.); dmontes35@uabc.edu.mx (D.G.M.)

² Facultad de Derecho, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, Mexicali 21280, Baja California, Mexico; quintana.lisandra@uabc.edu.mx

* Correspondence: ramon.ayala91@uabc.edu.mx (J.R.A.); marcos.coronado@uabc.edu.mx (M.A.C.)

Abstract


Bioethanol is a promising alternative to fossil fuels. This study evaluated bioethanol production from orange peel (OP) and brewer's spent grain (BSG) through acid hydrolysis, followed by fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. A factorial design was applied to assess the influence of temperature, acid concentration, and time on sugar release. Hydrolysis of OP at 125 °C with 0.5% H₂SO₄ yielded 52.14 g/L of glucose and 15.70 g/L of xylose. For BSG, the best results were obtained with 2.5% H₂SO₄ at 160 °C, producing 27.10 g/L of glucose and 14.22 g/L of xylose. Fermentation at 30 °C achieved 5.25% v/v bioethanol in OP and 1.5% v/v in BSG, representing 41.4 g/L and 11.8 g/L of bioethanol, respectively. The kinetic models showed high predictive accuracy ($R^2 > 0.98$). These findings demonstrate the potential of OP and BSG as viable substrates for bioethanol production under mild processing conditions.

Keywords: biomass conversion; factorial design; fermentation; reducing sugars; *Saccharomyces cerevisiae*



- 2) Asimismo, se presenta la publicación del artículo titulado “*Biomass Simulation: Orange and Eucalyptus Waste as a Source of Essential Oils Using Solar Energy*”, en la revista *Chemical Engineering & Technology*. Este artículo, del cual soy autor junto con otros colaboradores, aborda la valorización de residuos agroindustriales particularmente la cáscara de naranja y las hojas de eucalipto como materia prima para la obtención de aceites esenciales mediante un proceso de extracción acoplado al uso de energía solar. El estudio se basó en modelos de equivalencia para simular la biomasa y la producción de aceites, demostrando que la integración de colectores solares en el proceso permite una reducción del 10 % en la carga total de energía, al mismo tiempo que se favorece la producción de compuestos de alto valor agregado como el limoneno y el 1,8-cineol. Esta publicación constituye un respaldo científico y técnico al trabajo presentado en la tesis, ya que contribuye a la generación de conocimiento en torno a

la valorización de residuos y al uso de energías renovables en procesos industriales, además de servir como comprobante formal de la difusión de los resultados de la investigación en una revista arbitrada de alcance internacional.

These are not the final page numbers! \ \ \ 

Jesús Manuel Armenta
Gálvez
José Ramón Ayala Bautista
Marcos Alberto Coronado
Ortega*
Gisela Montero Alpérez
Daniela Guadalupe Lucía
Montes Núñez
Carlos Alfonso Sagaste
Bernal

Biomass Simulation: Orange and Eucalyptus Waste as a Source of Essential Oils Using Solar Energy

Orange processing and wood production industries generate wastes in the form of orange peel and eucalyptus leaves. These residues can be valorized as feedstocks to produce essential oils. Therefore, a simultaneous orange peel and eucalyptus leaves essential oil extraction process integrating solar energy was simulated. Biomass and essential oils were simulated by using equivalence models. The coupling of solar collectors allowed the extraction of eucalyptus essential oil, with a saving of 10% in the total energy load.

Keywords: Biomass simulation, 1,8-Cineole, Essential oils, Limonene, Solar energy

Received: June 13, 2023; *revised:* June 22, 2023; *accepted:* July 28, 2023

DOI: 10.1002/ceat.202300281

1 Introduction

Brazil, China, India, USA, Mexico, Egypt, and Spain are the most important countries in orange production. From 2016 to 2018, an average of 73 million tons of oranges were harvested worldwide. Around 34% of oranges is used for juice production, generating orange peel waste (OPW). Therefore, between 2016 and 2018, 12 million tons of OPW were estimated, with the potential use as raw material for essential oil extraction (EOE) and other compounds of interest [1].

Eucalyptus is the most widely planted hardwood worldwide, with approximately 18 million ha, and includes more than 700 species that grow in tropical and subtropical regions [2]. The *Eucalyptus globulus* is considered a reference species and has received special attention in the literature due to its rapid growth [3]. The branches and leaves of eucalyptus resulting

dal, and insecticidal properties and fumigant activity [8,9]. For ELEO, the terpene with the highest contribution is 1,8-cineole, whose concentration can range between 35 wt% and 45 wt%. The most representative components of OPEO (A) and ELEO (B) are depicted in Fig. 1.

The extraction method determines the possible application and final composition of the EO. The methods used for EOE are hydrodistillation, steam distillation, vacuum distillation, solvent extraction, cold pressing, supercritical fluid extraction, microwave extraction, and ultrasound [10–13]. Any factor that improves diffusivity and solubility in the methods will facilitate extraction: Solvent properties, raw material particle size, solvent:solid ratio, extraction temperature, and extraction time will affect extraction efficiency [14].

Industrial process simulation is a tool that allows studying the behavior of a process, analyze the influence of different variables

- 3) Como parte de la producción científica generada en el marco de este trabajo, se publicó el artículo titulado “*Systems and methods for citrus essential oil isolation: a patent review*” en la revista *Journal of Essential Oil Research* (Taylor & Francis, Vol. 36, No. 2, 2024). En este estudio, del cual soy coautor junto con Edson Eliseo Armenta, Marcos A. Coronado y José Ramón Ayala, se realizó una revisión de patentes relacionadas con los sistemas y métodos de aislamiento de aceites esenciales cítricos. El análisis abarcó bases de datos internacionales como Espacenet, Patentscope, Scopus, ScienceDirect, Google Patents, LENS ORG y USPTO, en el periodo de 2000 a 2021. Los resultados destacaron que la mayoría de las invenciones provienen de China y corresponden a métodos de aislamiento de aceites esenciales cítricos, mientras que las de Estados Unidos de América se caracterizan por sistemas con potencial de producción a gran escala. Asimismo, se identificó que el 74 % de las

patentes pertenece al sector privado y el 26 % al ámbito académico, siendo únicamente el 10.53 % de las invenciones las que protegen productos explotados comercialmente. Finalmente, se señaló la oportunidad de fortalecer la protección de métodos y sistemas que integren tecnologías de energías renovables. Esta publicación constituye un aporte relevante al conocimiento sobre la valorización de residuos agroindustriales y a la innovación tecnológica en el área de aceites esenciales.

JOURNAL OF ESSENTIAL OIL RESEARCH
2024, VOL. 36, NO. 2, 94–104
<https://doi.org/10.1080/10412905.2023.2300999>



Check for updates

Systems and methods for citrus essential oil isolation: a patent review

Edson Eliseo Armenta, Jesús Manuel Armenta, Marcos A. Coronado and José Ramon Ayala

Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

ABSTRACT

The citrus essential oil isolation has vast potential to valorize waste from the agro-industrial and food sectors. The objective of this work was to develop a review of patents on essential oil isolation systems from any plant and citrus essential oil isolation systems and/or methods. The technological search was carried out in the patent databases of Espacenet, Patentscope, Scopus, ScienceDirect, Google Patents, LENS ORG, and USPTO from 2000 to 2021. The results highlight that most of the inventions are from China and consist of isolation methods for citrus essential oil. The USA's inventions stand out as systems that can be produced on a larger scale. The patent shares of the educational and private sectors are 26% and 74%, respectively. About 10.53% of patents protect commercially exploited products. Finally, an opportunity was detected to protect methods and/or systems that integrate renewable energy technologies.

ARTICLE HISTORY

Received 23 February 2023
Accepted 21 December 2023

KEYWORDS

Extraction methods;
extraction systems; citrus;
essential oil; patent review

Introduction

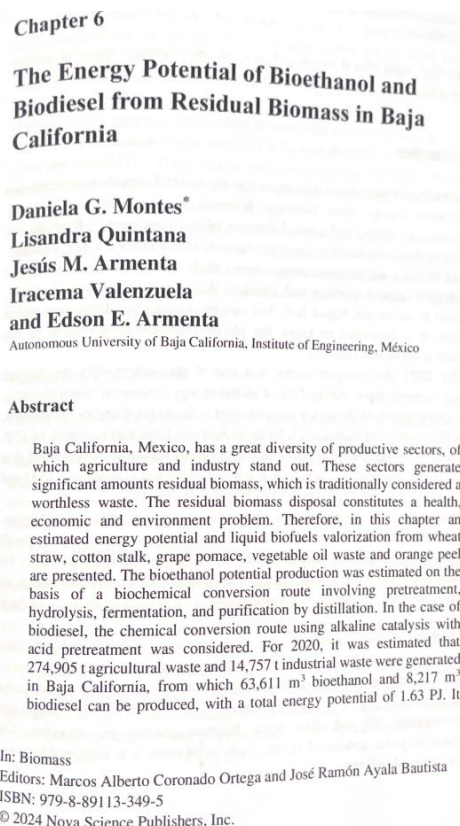
Essential oils (EO) are lipophilic and volatile secondary plant metabolic products with aromatic properties found in practically all plants. They are numerous and distributed in multiple plant segments, such as peels, barks, leaves, seeds, roots, stems, leaves, flowers, and fruits (1). EO are made up of terpenoids, phenylpropanoids, and phenols. Hydrocarbons and oxygenated compounds such as aldehydes, ketones, ethers, oxides, and alcohols can also be found (2). The EO compounds lose their properties due to volatility and exposure to

pressing, the EO also present a non-volatile fraction such as flavonoids, diterpenoids, sterols, and fatty acids, among others (4).

In 2021, the leading EO exporters were the United States of America, India, France, China, and Brazil. The United States of America, France, China, Germany, and Netherlands stand out among the principal EO-importing countries. This same year, Brazil, the United States of America, Germany, Mexico, and Netherlands appear as the largest exporters of orange essential oil (OEO), the most widely used citrus EO. The countries with the most imports of OEO were the United States of

- 4) Como evidencia adicional del trabajo académico y de la producción científica generada, se presenta el capítulo de libro titulado "Energy Potential of Bioethanol and Biodiesel from Residual Biomass in Baja California", del cual soy coautor junto con Daniela G. Montes, Lisandra Quintana, Iracema Valenzuela y Edson E. Armenta, bajo la edición de los doctores Marcos Alberto Coronado Ortega y José Ramón Ayala Bautista. El capítulo fue publicado en el libro *Biomass: The Novel Green Gold – Current Trends and Future Uses of Biomass Resources*, dentro de la sección *Energy Applications*, por Nova Science Publishing. Esta publicación refleja la pertinencia y el reconocimiento de la investigación en

torno al potencial energético de los biocombustibles obtenidos a partir de biomasa residual en Baja California, y constituye un respaldo académico que valida la calidad y relevancia del trabajo realizado en el marco de la presente tesis.



Comentado [mc4]:

Comentado [mc5R4]: Ya está publicado en el libro de Biomasa. Cambia la redacción y el probatorio.

Comentado [mc6R4]:

- 5) Como parte de la difusión de los resultados de investigación, se participó en el XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ (Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.), realizado en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). En este evento se presentó el trabajo titulado “*Simulación de la refinación de limoneno e hidrólisis ácida para la producción de pectina a partir de cáscara de naranja*”, en el área de Ingeniería de Procesos, Simulación y Control, bajo la modalidad oral. La participación en este congreso nacional constituye un espacio de validación académica y profesional, al permitir la exposición y discusión de los avances del proyecto de investigación ante la comunidad científica de la

ingeniería química en México, fortaleciendo así la pertinencia y el impacto del trabajo desarrollado en esta tesis.



- 6) Como parte de los logros derivados de la investigación, se obtuvo el registro de derecho de autor de la obra titulada *“Diseño de una planta de extracción de aceite esencial de cáscara de naranja y hoja de eucalipto residual”*, inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor. Esta obra fue desarrollada en colaboración con Marcos Alberto Coronado Ortega, Conrado García González, Samuel Lepe de Alba, Gisela Montero Alpírez y José Ramón Ayala, teniendo como titular a la Universidad Autónoma de Baja California. Este reconocimiento legal otorga protección a la autoría de la obra y respalda el carácter original del trabajo, fortaleciendo la evidencia documental y académica del proyecto de investigación que sustenta la presente tesis.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENIA GALVEZ JESUS MANUEL
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
LEPE DE ALBA SAMUEL
MONTERO ALPIREZ GISELA
RAMON AYALA JOSE

TÍTULO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE EXTRACCION DE ACEITE ESENCIAL DE CASCARA DE NARANJA Y HOJA DE EUCALIPTO RESIDUAL

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3º de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I, II y III de la Ley Federal del Derecho de Autor, no es objeto de protección como derecho de autor: las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras; los esquemas, planes o reglas para realizar actos mentales, juegos o negocios.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

- 7) Como parte de los resultados de investigación y protección intelectual, se obtuvo el registro de derecho de autor de la obra titulada *“Extractos y aceites esenciales: estudio de su importancia en el medio ambiente”*, inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor. Esta obra fue elaborada en colaboración con diversos coautores, entre ellos Edson Eliseo Armenta, José Ramón Ayala Bautista, Marcos Alberto Coronado Ortega, Laura Duarte Jaramillo, Lizbeth Adriana Gutiérrez Esquivel, Daniela Guadalupe Lucía Montes Núñez, Álvaro Andrés Ortiz Pérez, Carlos Alfonso Sagaste Bernal y Nila Andrea Urbano. El titular de la obra es la Universidad Autónoma de Baja California, y el registro ampara de manera legal la originalidad y autoría del trabajo. Este certificado refuerza la validez académica y científica del proyecto, al mismo tiempo que respalda su carácter innovador dentro de la línea de investigación sobre aprovechamiento de extractos y aceites esenciales con relevancia ambiental.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
MONTES NUÑEZ DANIELA GUADALUPE LUCIA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
SAGASTE BERNAL CARLOS ALFONSO
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: EXTRACTOS Y ACEITES ESENCIALES: ESTUDIO DE SU IMPORTANCIA EN EL MEDIO AMBIENTE

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121310594400-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



- 8) Dentro de los logros alcanzados en la línea de investigación, se cuenta con el registro de derecho de autor de la obra titulada *“Sistema de gestión integral de cáscara de naranja residual en Mexicali, Baja California”*, inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor. Esta obra fue desarrollada en colaboración con Edson Eliseo Armenta, José Ramón Ayala Bautista, Marcos Alberto Coronado Ortega, Laura Duarte Jaramillo, Lizbeth Adriana Gutiérrez Esquivel, Álvaro Andrés Ortiz Pérez y Nila Andrea Urbano, teniendo como titular a la Universidad Autónoma de Baja California. El certificado otorga protección legal a la autoría y originalidad de la obra,

asegurando su reconocimiento académico y reforzando el carácter innovador de la propuesta en torno al aprovechamiento y gestión sustentable de la cáscara de naranja residual en el contexto regional.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: SISTEMA DE GESTION INTEGRAL DE CASCARA DE NARANJA RESIDUAL EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 166 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 206, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-120711222700-01

Ciudad de México, a 14 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



- 9) Entre los resultados obtenidos también se encuentra el registro de derecho de autor de la obra titulada *“Aceites esenciales como ingredientes activos para el padecimiento de la pediculosis”*, inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor. Esta obra fue elaborada en colaboración con Edson Eliseo Armenta, José Ramón Ayala Bautista, Marcos Alberto Coronado Ortega, Laura Duarte Jaramillo, Lizbeth Adriana Gutiérrez Esquivel, Álvaro Andrés Ortiz Pérez y Nila Andrea Urbano, teniendo como titular a la Universidad Autónoma de Baja California. Este certificado otorga

reconocimiento legal a la autoría y originalidad del trabajo, lo cual respalda la pertinencia científica y aplicada de la investigación en el ámbito de los aceites esenciales y su uso potencial en tratamientos de salud.

CERTIFICADO
Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BAUTISTA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
URBANO NILA ANDRES

TÍTULO: ACEITES ESENCIALES COMO INGREDIENTES ACTIVOS PARA EL PADECIMIENTO DE LA PEDICULOSIS

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 63 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 169 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121310472600-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022
EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR


JESÚS PARETS GÓMEZ
SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR



- 10) Dentro de los registros obtenidos ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor se encuentra la obra titulada *“Biogás a partir de estiércol bovino”*, inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor. Este trabajo fue realizado en colaboración con Edson Eliseo Armenta, José Ramón Ayala Bautista, Marcos Alberto Coronado Ortega, Laura Duarte Jaramillo, Lizbeth Adriana Gutiérrez Esquivel, Álvaro Andrés Ortiz Pérez, Ricardo Torres Ramos y Nila Andrea Urbano, bajo la titularidad de la Universidad Autónoma de Baja California. El certificado avala la originalidad de la obra

y respalda su relevancia académica al abordar el aprovechamiento de residuos pecuarios como fuente de energía renovable mediante la producción de biogás. Este reconocimiento refuerza la aportación científica en el ámbito de las energías limpias y el desarrollo sustentable.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: ARMENTA GALVEZ EDSON ELISEO
ARMENTA GALVEZ JESUS MANUEL
AYALA BALTIMA JOSE RAMON
CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
DUARTE JARAMILLO LAURA
GUTIERREZ ESQUIVEL LIZBETH ADRIANA
ORTIZ PEREZ ALVARO ANDRES
TORRES RAMOS RICARDO
URBANO NILA ANDREA

TÍTULO: BIOGAS A PARTIR DE ESTIERCOL BOVINO

RAMA: LITERARIA

TITULAR: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original Literaria.

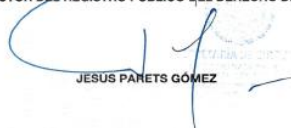
Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; y artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior de Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2022-121311005900-01

Ciudad de México, a 15 de diciembre de 2022

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR


JESÚS PANETS GÓMEZ



- 11) De igual manera, se obtuvo el certificado de finalización del curso internacional en línea "Response Surfaces, Mixtures, and Model Building", impartido por la Arizona State University y autorizado a través de la plataforma Coursera. Este curso, concluido satisfactoriamente el 22 de noviembre de 2022, estuvo orientado al diseño de superficies de respuesta, mezclas y construcción de modelos estadísticos, herramientas de gran relevancia para la optimización de procesos experimentales en ingeniería

química. La acreditación fue avalada por el profesor Douglas C. Montgomery, especialista en estadística aplicada al diseño de experimentos, lo que respalda la formación técnica adquirida en metodologías avanzadas de modelado y análisis experimental.



- 12) Durante mis estudios de doctorado, participé en el curso en línea "Biotecnología de las Fermentaciones" (mayo-junio de 2023), impartido por el M. en C. Eduardo Rodríguez Cuevas. Este curso me permitió reforzar conocimientos en los fundamentos y procesos de fermentación, así como en las tecnologías y aplicaciones relacionadas, aportando bases teóricas y prácticas relevantes para el desarrollo de mi investigación doctora

BIOTECNOLOGÍA DE LAS FERMENTACIONES

CURSO ONLINE

FECHAS:

Sábados del 13 mayo al 10 de junio del 2023.
9:00 AM a 12:00 PM. Hora de la Ciudad de México.

PONENTE:

M. en C. Eduardo Rodríguez Cuevas.
M. en C. en Biotecnología por el Instituto Politécnico Nacional
"UPIBI-IPN".

MÓDULOS DEL CURSO:

- Fundamentos de la fermentación.
- Procesos de fermentación.
- Tecnología de las fermentaciones.
- Aplicaciones.



13) Como parte de la formación complementaria vinculada al presente trabajo de investigación, se obtuvo el Certificado del Curso General de Propiedad Intelectual, emitido por la Academia de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) en colaboración con el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). Este curso, concluido satisfactoriamente, proporcionó una base sólida en los principios de propiedad intelectual, derechos de autor y protección de innovaciones, lo cual refuerza la comprensión y aplicación de los aspectos legales relacionados con el desarrollo de proyectos de investigación y su transferencia tecnológica.



Academia de la OMPI

CERTIFICADO

Por el presente se certifica que

Jesus Manuel Armenta Gálvez

ha completado satisfactoriamente
el curso de enseñanza a distancia titulado

CURSO GENERAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

- 14) Asimismo, se cuenta con la constancia de participación en el ciclo de conferencias “La Propiedad Intelectual y la Juventud: Innovar para un Futuro Mejor”, otorgada por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) a través del Instituto de Ingeniería. Este evento se celebró en el marco del Día Mundial de la Propiedad Intelectual, organizado por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) y el Centro Inteligente de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la UABC, en colaboración con el Ecosistema STEAM UABC. La asistencia a este ciclo de conferencias permitió fortalecer los conocimientos en materia de propiedad intelectual y su vinculación con la innovación juvenil, resaltando la importancia de la transferencia tecnológica y la protección de los resultados de investigación para el desarrollo de un futuro sostenible.



La Universidad Autónoma de Baja California a través del Instituto de Ingeniería otorga la presente

CONSTANCIA

Jesús Manuel Armenta Gálvez

Por haber asistido al ciclo de conferencias "La Propiedad Intelectual y la Juventud: Innovar para un Futuro Mejor".

Con motivo del Día Mundial de la Propiedad Intelectual celebrado por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), en el marco de actividades del Modelo de Vinculación Inteligente-Centro Inteligente de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la UABC y el Ecosistema STEAM UABC.



Dr. Mario Alberto Curiel Álvarez
Director
del Instituto de Ingeniería



Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega
Responsable de Propiedad Intelectual
del Instituto de Ingeniería

POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE
Mexicali, Baja California, México a 26 de abril de 2022

