

El sargazo como materia prima para la obtención de bioproductos: un análisis de factibilidad tecno-económica

Sargassum as raw material for the production of bioproducts: a techno-economic feasibility analysis

Pérez Ramírez David Enrique¹, Chavira Conejo Felix Emmanuel², Ortega Zacarias Ana Abigail², Morales-Rodríguez Ricardo^{2*}

¹Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato. ²Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato.
ricardo.morales@ugto.mx*

Resumen

Este estudio presenta un análisis de factibilidad tecno-económica para la producción de bioetanol a partir de algas *Sargassum* spp., una biomasa marina que ha proliferado a lo largo de las costas de África Occidental y América, causando desafíos ambientales y económicos significativos. La investigación evalúa el potencial de utilizar *Sargassum* como materia prima para la producción de bioetanol, una alternativa sostenible a los combustibles fósiles no renovables. La metodología implica la extracción de datos de un estudio de tecnología de alta presión para el pretratamiento y fraccionamiento de la biomasa de *Sargassum* spp. y la simulación del proceso de producción de bioetanol usando el software Aspen Plus V10. El proceso incluye las etapas de pretratamiento, hidrólisis enzimática, fermentación y la separación y purificación del producto. Los hallazgos sugieren que, aunque la producción de bioetanol a partir de *Sargassum* es técnicamente viable a escala experimental, esta aún enfrenta desafíos económicos significativos, debido a los altos costos de capital inicial y gastos operativos en comparación con las ventas totales de productos.

Palabras clave: sargazo; bioetanol; levadura; pretratamiento; hidrólisis enzimática; inóculo; fermentación; factibilidad.

1.- Introducción

Debido al incremento de diversas especies de *Sargassum* spp. en la costa de África occidental y el desplazamiento de esta hacia América se han propuesto diversas estrategias que afronten su llegada, implementando su uso en diversas áreas.

El bioetanol es un tipo de biocombustible producido a partir de productos orgánicos y biomasa vegetal. En los últimos años, la producción de dicho combustible a partir de *Sargassum* spp. ha emergido como alternativa al uso de energías fósiles no renovables, sustituyendo estas por fuentes limpias y verdes.

1.1.-Estado del arte

Durante los últimos años, ha emergido una nueva preocupación global, el sargazo, compuesto principalmente por algas flotantes de especies como *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, la cual ha proliferado masivamente generando impactos negativos en los ecosistemas costeros, la economía local y la industria turística. El sargazo ha experimentado un aumento en su presencia en áreas como el Mar Caribe y el Golfo de México desde el 2015, atribuido a factores como cambios en las corrientes oceánicas, nutrientes agrícolas excesivos en el mar (eutrofización) y el calentamiento global.

Desde el 2011, los parches de la macroalga han incrementado en densidad, tanto así que se ha generado un cinturón de aproximadamente 8,850 km de longitud que va desde el oeste de África hasta el Mar Caribe y el Golfo de México, al que se le ha llamado el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, que en 2018 contenía alrededor de 20 millones de toneladas de la biomasa del sargazo (Wang et al., 2019).

Además, este fenómeno afecta negativamente a la biodiversidad marina al alterar hábitats naturales al arribar a las costas, ya que puede introducir especies invasoras a nuevos ecosistemas, afectando los nichos ecológicos y las cadenas tróficas, los cuales sirven de hábitat y refugio de bacterias, plantas, algas, vertebrados e invertebrados. De igual manera, obstaculiza la navegación y el turismo al acumularse en las playas, y representa un desafío para la gestión costera y la salud pública debido a la liberación de gases tóxicos cuando se descompone, por la presencia de compuestos azufrados. El sargazo presenta desafíos logísticos y económicos para los gobiernos y las comunidades locales, que deben implementar estrategias de limpieza y gestión eficientes para minimizar sus efectos.

Una de ellas es la recolección de sargazo en la playa, que no es el escenario deseado, ya que su acumulación en las costas provoca agotamiento excesivo del oxígeno y la inducción de descomposición vía anaeróbica. Por lo cual, el objetivo es la recolección de sargazo en mar abierto evitando que se rebase la barrera arrecifal. (Telma Gloria Castro Romero et al., 2019).

México ha implementado diversas estrategias para combatir el problema del sargazo en sus costas, especialmente en la zona del Caribe. La Secretaría de Marina (SEMAR) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), emplean barcos sargaceros y barreras flotantes para contener y recolectar las macroalgas antes de que arriben a las playas, complementado con limpieza manual y de maquinaria pesada.

López Miranda et al. (2021) han explorado diversas soluciones, desde métodos de monitoreo y predicción más precisos hasta tecnologías innovadoras para recolectar y utilizar el sargazo de manera sostenible. Se ha estudiado su potencial uso en su incorporación en bloques de construcción sostenible, su uso como fuente alternativa de productos agrícolas como biofertilizantes, bioestimulantes y mejoradores de suelo. Asimismo, se han desarrollado campañas de concientización para informar a la población local y a los turistas sobre el problema del sargazo y las medidas de mitigación, buscando minimizar su impacto ambiental y económico.

El sargazo tiene variados usos que cambian según sus diferentes propiedades. Debido a su composición nutricional y a la presencia de compuestos bioactivos, el *Sargassum* puede tener usos potenciales como alimento para consumo humano o animal. En Japón, específicamente, el 85 % de la producción de algas se destina al consumo humano. El *Sargassum* spp. contiene compuestos como fucoxantina y fucosterol, que son de especial interés en el área de la salud debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antidiabéticas, anticancerígenas y reductoras del colesterol (Amador-Castro et al., 2021).

Dicha alga ha despertado gran interés en la agricultura, ya que posee factores que mejoran el crecimiento, la salud y el rendimiento de las plantas, mejorando la textura y la capacidad de retención de humedad del suelo. El *Sargassum* spp. también se ha utilizado como biofiltro para eliminar metales pesados y otros contaminantes. Debido a su capacidad para consumir nitrógeno y fósforo, el sargazo también se ha empleado en la mitigación de derrames de efluentes contaminantes (Amador-Castro et al., 2021).

Otra aplicación del *Sargassum* spp., es su utilización para producir bioetanol. Dado que las algas tienen un contenido bajo de lignina, se facilita el proceso de pretratamiento y se reducen los costos involucrados. Sin embargo, sigue siendo un desafío actual encontrar microorganismos asequibles que puedan fermentar la masa de sargazo (Amador-Castro et al., 2021).

1.2.- Ruta Metabólica

En la obtención de bioetanol a partir de glucosa empleando *Saccharomyces cerevisiae* se llevan a cabo dos etapas en la ruta metabólica (ver Fig. 1). La glucólisis es donde se rompe la molécula de glucosa para obtener 2 piruvatos, y la fermentación alcohólica, donde a partir de un piruvato se produce una molécula de etanol y otra de CO₂. Primero reacciona la glucosa con una molécula de ATP y forma glucosa-6-fosfato; reacción catalizada por la enzima hexocinasa (HK). Después, la glucosa-6-fosfato empleando la fosfohexosa isomerasa se forma fructosa-6-fosfato. La fructosa-6-fosfato acepta un segundo fosfato de un ATP, y se genera fructosa-1,6-bifosfato; la enzima usada es la fosfofructocinasa (PFK-1). La fructosa-1,6-bifosfato se divide en dos azúcares de 3 carbonos, gliceraldehído-3-fosfato y dihidroxiacetona fosfato. La dihidroxiacetona fosfato se convierte enzimáticamente (fosfotriosa isomerasa) en gliceraldehído-3-fosfato. Las moléculas de gliceraldehído-3-fosfato se oxidan, y el NAD⁺ se reduce a NADH, produciendo fosfoglicerato; este reacciona con un ortofosfato (Pi) para formar 1,3-bifosfoglicerato con la enzima gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa. El 1,3-bifosfoglicerato reacciona con el ADP para formar ATP, generando 2 moléculas de 3-fosfoglicerato mediante la enzima fosfoglicerato cinasa. El grupo fosfato remanente de los 3-fosfoglicerato se transfiere enzimáticamente de la posición 3 a la posición 2, produciendo dos moléculas de 2-fosfoglicerato, reacción regulada por la fosfoglicerato mutasa. En este paso se elimina una molécula de agua de la molécula 2-fosfoglicerato mediante una enzima enolasa produciendo fosfoenolpiruvato (PEP). Finalmente, el PEP transfiere su grupo fosfato a una molécula de ADP para formar ATP y piruvato mediante la enzima piruvato cinasa (PK). Así obteniendo 2 piruvatos y 2 ATP por cada molécula de glucosa. El piruvato sufre una descarboxilación por la enzima piruvato descarboxilasa y forma CO₂ y acetaldehído; este último reacciona con la enzima alcohol deshidrogenasa y oxida un NADH para formar etanol (EtOH).

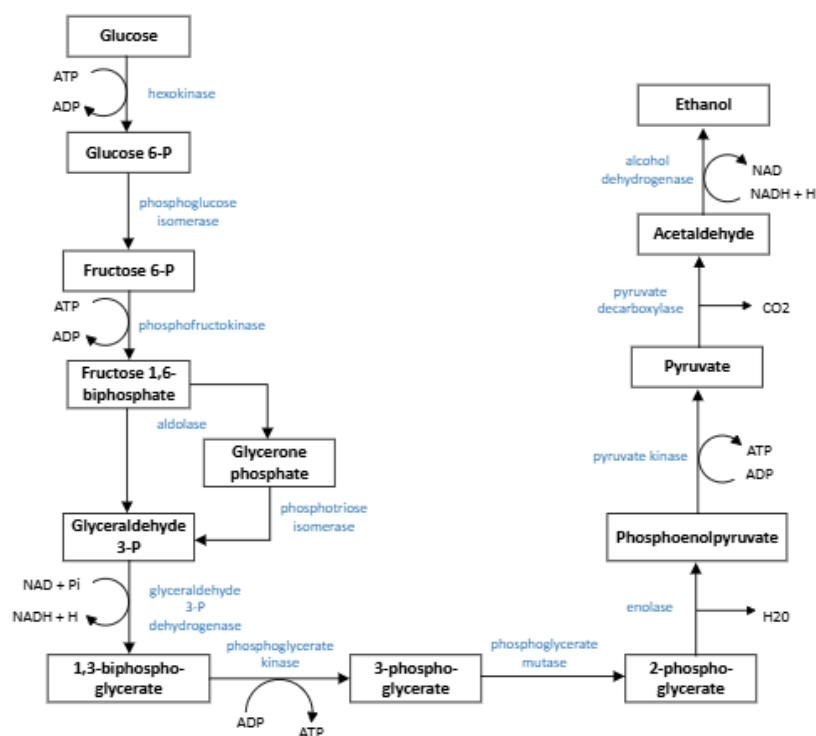


Fig. 1. Ruta metabólica para la obtención de bioetanol.

2.- Objetivos

- Desarrollar e implementar una metodología sistemática para el diseño del proceso de producción de bioetanol a partir de sargazo.
- Llevar a cabo el análisis económico del procesamiento del sargazo para la obtención de etanol.

3.- Hipótesis

La producción de bioetanol a partir de sargazo es una alternativa factible para mitigar y dar uso a esta especie invasora. El uso de información experimental permitirá realizar la evaluación técnica y económica de la producción a escala industrial, empleando la herramienta computacional Aspen Plus V10.

4.- Metodología

El desarrollo de este estudio incluye dos secciones principales, la búsqueda y extracción de datos para la producción de etanol a partir de sargazo y, la simulación y evaluación económica del proceso de producción.

4.1.- Extracción de datos

Aparicio et al. (2021) presentan un estudio experimental para producir bioetanol a partir de sargazo en el que emplean tecnología de alta presión para el pretratamiento y fraccionamiento de la biomasa del sargazo, para producir bioetanol de tercera generación. Se demostró que el pretratamiento hidrotermal es efectivo para enriquecer la biomasa con glucano, lo que facilita la hidrólisis enzimática y la producción de bioetanol. En el estudio se obtuvo un rendimiento teórico de bioetanol de 76 % mediante la estrategia de pre-sacarificación y fermentación simultánea (PSSF, por sus siglas en inglés). De esta fuente se extrajeron los datos de cada etapa del proceso que se describe en el artículo, las cuales incluyen la caracterización fisicoquímica de la biomasa del sargazo, el pretratamiento, la preparación del inóculo, y la PSSF. En la sección de la caracterización de la biomasa se observa que los polisacáridos más abundantes en el sargazo son el glucano,

galactano y el fucoidano, estos se encuentran en las paredes celulares de estas algas; además de presentarse residuos de ácidos insolubles, ceniza, entre otros componentes. En ese estudio los autores realizaron diferentes experimentos para el pretratamiento empleando variadas condiciones de temperatura, presión y tiempo de residencia, siendo mejor la condición de 190 °C, 50 minutos y 11.54 bar, donde se obtuvo un 48.53 % de sólido recuperado tras el pretratamiento, además de 33.32 g de glucano y 54.20 g de residuos de ácidos insolubles por cada 100 g del sólido que se recuperó, lo cual fue mayor que en las otras condiciones con las que se experimentaron. En la parte de preparación del inóculo se empleó la levadura del pan *Saccharomyces cerevisiae* y se hizo crecer a 35 °C en un medio con 50 g/L de glucosa y 10 g/L de peptona como fuente de nitrógeno, por 16 horas. Se realizó una centrifugación a la suspensión celular para luego ser resuspendido en una solución con 0.9 % de NaCl, con una concentración final de 200 g de levadura por litro. Posteriormente se realizó una hidrólisis enzimática en la PSSF a 50 °C, donde se usó como sustrato la biomasa de *Sargassum* pretratada a una carga de 13 % w/v, para ello se emplearon los cocteles enzimáticos Cellic CTec2 y Cellic HTec2 de *Trichoderma reesei* de Novozymes que contienen celulasas y hemicelulasas respectivamente, a una relación de 1:2 (v/v) y una carga de 15 FPU por gramo de glucano, considerando que la actividad de celulasa es de 118 FPU/mL. Además, se adicionaron 100 µL de tetraciclina y 75 µL de cicloheximida de una solución stock de 10 g/L para evitar el crecimiento microbiano durante la hidrólisis. Tras 24 horas se disminuyó la temperatura de 50 a 35 °C y se inoculó *Saccharomyces cerevisiae* a una concentración de 8 g/L de levadura en suspensión de 0.9 % NaCl, por litro para iniciar con la fermentación. Se menciona que al cuantificar la cantidad de etanol producido a las 12 horas de la fermentación se obtuvo un rendimiento del 76 %, sin embargo, la glucosa se agotó por completo, por lo que los autores creen que el mayor pico de rendimiento ocurrió antes de las 12 horas.

4.2.- Estructura del proceso

Los resultados obtenidos por Aparicio et al. (2021) fueron colectados y procesada para realizar la simulación del proceso, empleando la herramienta computacional Aspen Plus V10. El diagrama del proceso se ilustra en la Fig. 2. Los autores presentan resultados empleando procesos por lotes en todas las etapas, por lo tanto, para realizar la evaluación técnica y económica, una de las estrategias implementadas fue utilizar reactores en paralelo según la sección del proceso, por ejemplo, cuando se habla de la sección de fermentación que dura 16 horas se necesitaba sincronizar esta cantidad de horas con las 24 horas del reactor enzimático, las 16 horas de preparación con el inóculo, y los 50 minutos del pretratamiento. De esta manera se logró transformar la estructura del proceso que originalmente era por lotes para convertirlo en un proceso continuo.

El proceso a nivel industrial fue analizado empleando el programa ASPEN PLUS V10, donde se emplearon las relaciones obtenidas en la sección 4.1. La base de cálculo fue calculada empleando en los datos históricos reportados por la SEMARNAT de 2020 a la fecha, esta información permitió calcular el promedio anual, además de una proyección para este año 2024 (<https://app.semarnat.gob.mx/sargazo/#/reporteador>). La información anterior permitió determinar que la base de cálculo a emplear en este estudio fue de 1.7 Ton/h de sargazo para la obtención de etanol.

4.2.1.- Pretratamiento de alta presión

El proceso inicia con el pretratamiento, en el cual se alimenta la materia sólida, agua y vapor de agua hasta alcanzar las condiciones de 190 °C y 1 atm. Como resultado del pretratamiento (R.101), se disminuye la cantidad de sólido a un 48.53 %. El producto se hace pasar a través de un flash donde se retira el agua de la corriente obteniendo como producto los sólidos pretratados, dicha corriente entra en un intercambiador de calor para alcanzar la temperatura de operación del reactor de la siguiente etapa.

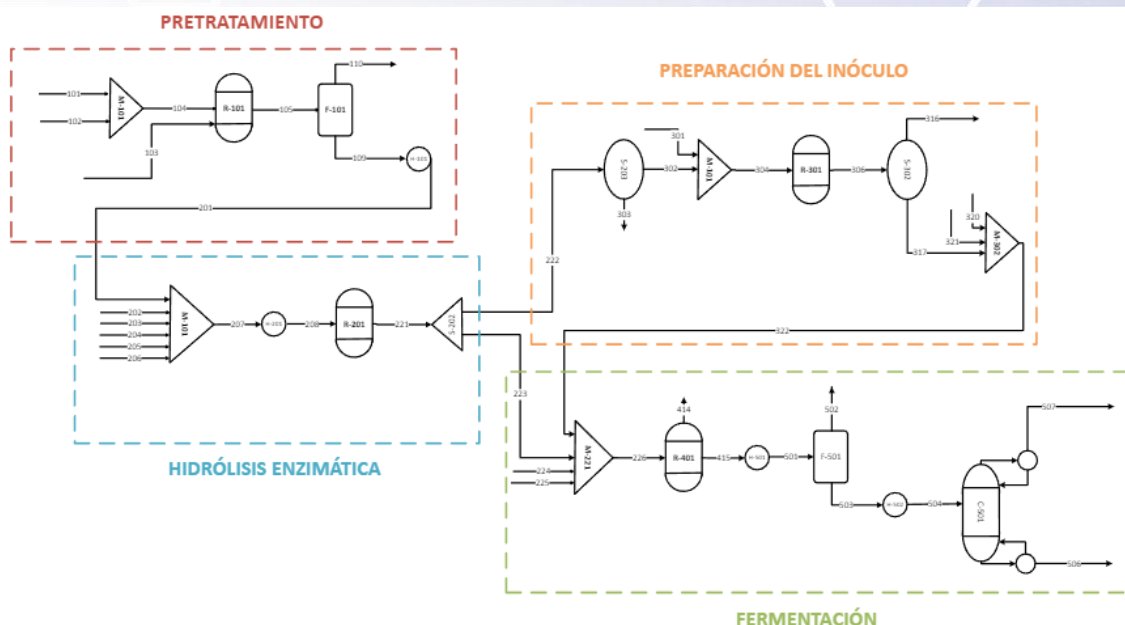


Fig. 2. Diagrama general del proceso para la obtención de bioetanol.

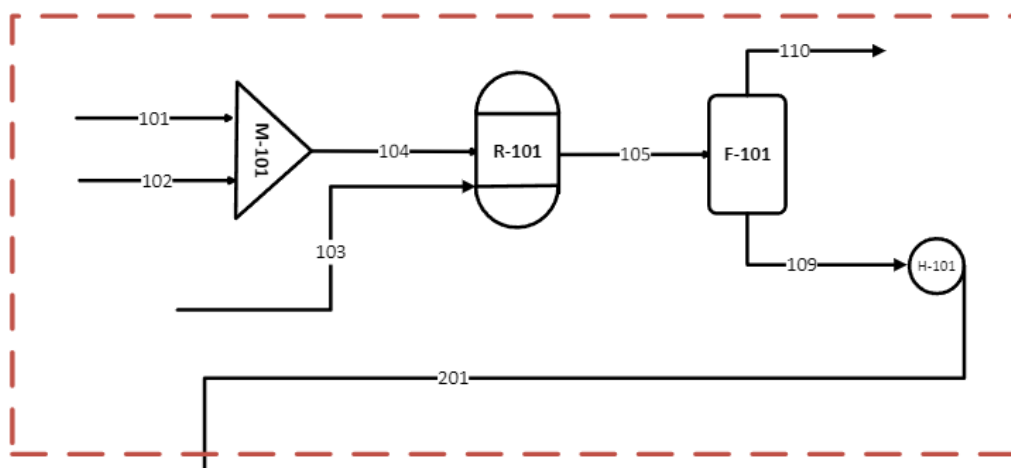


Fig. 3. Diagrama general del pretratamiento de alta presión.

4.2.2.- Hidrólisis enzimática

La siguiente etapa del proceso es la hidrólisis enzimática, la cual se ilustra en la Fig. 4. En este estudio emplean dos cocteles de enzimas, siendo las Cellic CTec2 y Cellic HTec2, además de ciertos antibióticos para proteger la mezcla de contaminación, diluidos en agua. Las corrientes de estos compuestos se mezclan (M-101) para posteriormente pasar a la fase de reacción donde se colocan 6 reactores en paralelo; en esta sección se cumple la función de convertir el proceso lote en uno continuo. Esto se logra empleando una tabla de operación. El proceso de hidrólisis enzimática de lleva a cabo a 1 atm y 50 °C, con 24 horas de tiempo de residencia.

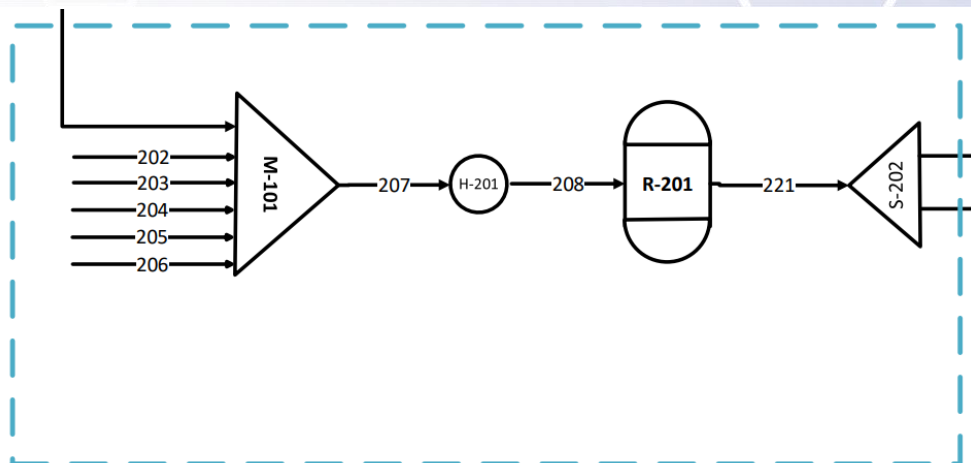


Fig. 4. Diagrama general de la hidrólisis enzimática.

4.2.3.- Procesos de fermentación

4.2.3.1.- Preparación del inóculo

Parte de la glucosa obtenida en el proceso se separa para la preparación del inóculo (ver Fig. 5). Dicha corriente pasa a un separador de sólidos (S-203). La glucosa diluida en la fase líquida se mezcla (M-101) con la fuente de nitrógeno (301) para después entrar al reactor (R-301), donde se lleva a cabo el crecimiento de la levadura a las condiciones operativas de 35 °C y 1 atm. Después de 16 horas, se centrifuga y la fase sólida (células) se resuspende en una solución salina para dejar preparado el inóculo y pasar al proceso de fermentación (322).

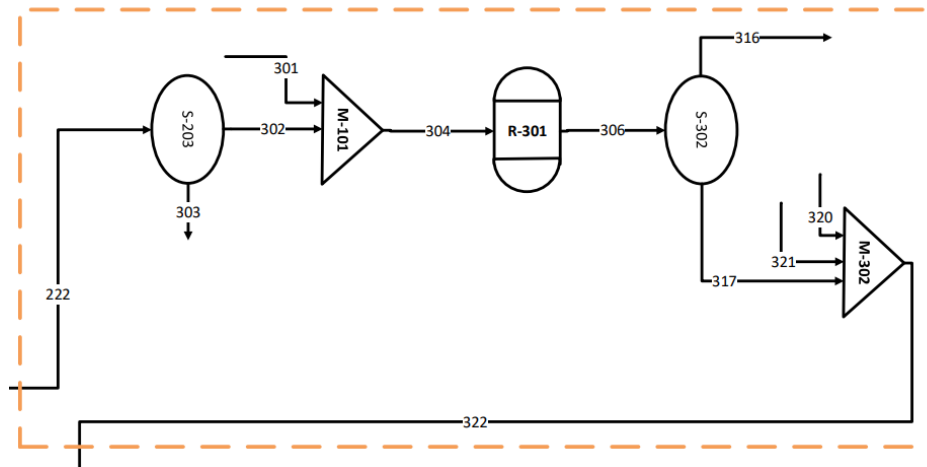


Fig. 5. Diagrama general de la preparación del inóculo.

4.2.3.2.- Fermentación

La Fig. 6 muestra la sección de la fermentación y proceso de separación. La glucosa que no se utiliza en la corriente paralela de la preparación del inóculo (223), se mezcla (M-221) con el inóculo y peptona (224) siguiendo las relaciones reportadas por (Aparicio et al., 2021). Esta mezcla se envía al bloque de seis reactores de fermentación, que operan en ciclos de 16 horas cada uno, manteniendo condiciones de 35 °C y 1 atm. La purga de CO₂, se simula empleado una unidad flash con las condiciones de operación del reactor, en el cual se alcanza un rendimiento del 76 %.

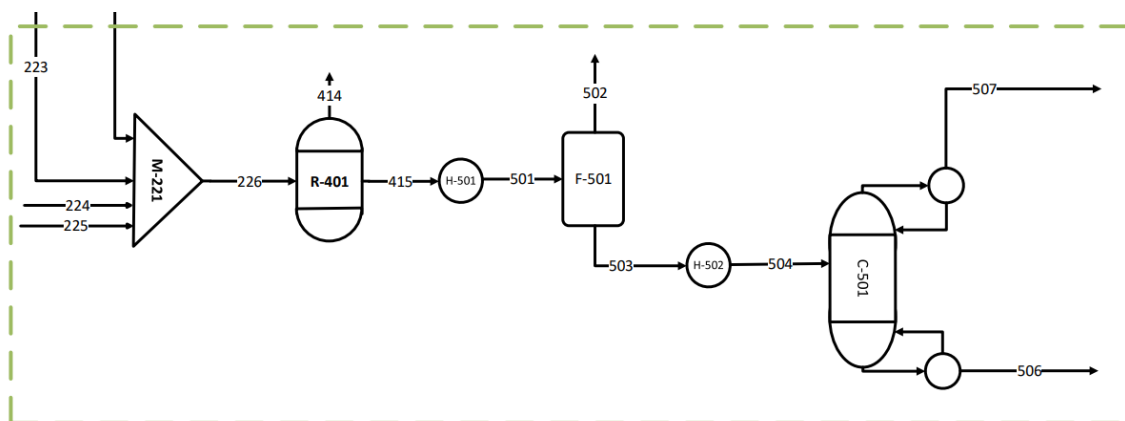


Fig. 6. Diagrama general del proceso de fermentación.

4.2.4.- Procesos de separación

4.2.4.1.- Flash pre-columna de destilación

La corriente de salida del proceso de fermentación (503) pasa por un intercambiador de calor (H-501) el cual incrementa la temperatura a 70 °C, con el objetivo de retirar la mayor cantidad de CO₂. Posteriormente, la corriente de etanol con agua y productos sólidos pasa a un intercambiador de calor (H-502) que eleva la temperatura a 97.9 °C, condicionando la corriente para su entrada en la columna de destilación.

4.2.4.2.- Columna de destilación

La columna de destilación se diseñó empleando los métodos cortos propuestos por Fenske-Underwood-Gilliland, seguido de la implementación de los métodos rigurosos. La corriente de entrada se alimenta a la temperatura de burbuja correspondiente a la concentración de agua y etanol presente (97.9 °C). Las especificaciones de la columna incluyen un condensador parcial, una recuperación de etanol del 99 % y una composición no mayor al azeótropo que se encuentra en la mezcla.

5.- Resultados

El procesamiento de 1,700 kg/h de sargazo producen 67.43 kg/h de bioetanol, que representa el 4 % de conversión total de rendimiento teórico. Al considerar los procesos de separación se obtiene un 3.9 % de bioetanol real obtenido.

En análisis económico se realizó empleando la sección de Aspen Process Economic Analyzer V10, la cual permite realizar la estimación de capital y operación. Este análisis requiere del costo comercial de los insumos y productos. La Tabla 1 muestra el costo de los reactivos y productos.

Los resultados obtenidos al emplear Aspen Process Economic Analyzer V10 se muestran en la Tabla 2. Al comparar los costos de ventas de productos con los costos de operación, se observa que los costos de operación son significativamente mayores a las entradas por venta de producto. Este mismo resultado se observa al comparar los costos de por materias primas y entrada por venta de producto. Los anterior permite identificar que el proceso aún no es factible desde el punto de vista económico.

Tabla 1. Tabla de precios de reactivos.

Reactivo	Precio (MXN)	Precio (USD)
Cellic CTec2	\$49,373.91	2,711.36

Cellic HTec 2	\$49,373.91	2,711.36
Tetraciclina	\$55,950	3,072.48
Cicloheximida	\$978,000	53,706.75
Peptona	\$6,746	370.62
NaCl	\$1,831	100.54
Glucosa	\$1,278	70.1821
Levadura	\$4,283	235.2
Bioetanol	\$18.21	1

Fuente: <https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/sial/t3383>

Tabla 2. *Tabla de costos de proceso obtenido en Aspen Plus V10*

Concepto	Valor
Costo total de capital [USD]	\$ 18,050,700.00
Costo operativo total [USD/Año]	\$ 823,141,000.00
Costo Total de Materias Primas [USD/Año]	\$ 759,616,000.00
Ventas totales de productos [USD/Año]	\$ 591,058.00
Costo de utilidades total [USD/Año]	\$ 307,982.00
Tasa de rendimiento deseada [porcentaje/Año]	\$ 20.00
Costo del equipo [USD]	\$ 1,180,100.00
Costo total de instalación [USD]	\$ 4,439,000.00

En este estudio se planteó el no emplear glucosa para el crecimiento del inóculo como lo propone (Aparicio et al., 2021), ya que se empleó una corriente del producto de la hidrólisis enzimática, la cual tiene la concentración necesaria para llevar a cabo el crecimiento de microorganismo.

Este estudio es un primer análisis de costos de manera rigurosa. De acuerdo con los resultados, se puede identificar que es necesario mejorar las condiciones experimentales para obtener un proceso factible desde el punto de vista económico. En la sección de los procesos de separación, consideramos la posibilidad de optimizar la columna de destilación esto debido a que en general se obtiene alrededor de 68.03 kg/h de bioetanol, donde se tiene una pérdida cercana al 1%.

6.- Conclusiones

Los resultados indican que el costo total de capital representa una inversión inicial de 18,050,700 USD que, sin contar los costos operativos ni los costos de las materias primas se requeriría de aproximadamente 30 años para recuperar la inversión. Los costos de operación y servicios son significativamente en comparación con las potenciales ganancias por la venta del bioetanol. Lo anterior permite determinar que el proceso aún no es factible desde el punto de vista económico, lo cual no es ninguna sorpresa, pues se ha demostrado que los biocombustibles siguen siendo un gran tema de investigación. Lo anterior indica que aún es necesario analizar con mayor detalle otras condiciones de operación que permitan mejorar la economía del proceso. Los resultados obtenidos en este estudio no fueron sujetos a ningún tipo de optimización, por lo tanto, las investigaciones futuras podrían centrarse en la optimización del proceso para mejorar la viabilidad económica.

7.- Bibliografía

- Amador-Castro, F., García-Cayuela, T., Alper, H. S., Rodríguez-Martínez, V., & Carrillo-Nieves, D. (2021). Valorization of pelagic sargassum biomass into sustainable applications: Current trends and challenges. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 283). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112013>
- Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Pinales-Márquez, C. D., Loredó-Treviño, A., Robledo-Olivo, A., Aguilar, C. N., Kostas, E. T., & Ruiz, H. A. (2021). High-pressure technology for *Sargassum* spp biomass pretreatment and fractionation in the third generation of bioethanol production. *Bioresource Technology*, 329, 124935. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124935>
- López Miranda, J. L., Celis, L. B., Estévez, M., Chávez, V., van Tussenbroek, B. I., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rosillo Pantoja, I., Masia, L., Cauich-Kantun, C., & Silva, R. (2021). Commercial Potential of Pelagic *Sargassum* spp. in Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 8, 768470. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2021.768470/BIBTEX>
- Telma Gloria Castro Romero, D., Cerdeira Estrada, S., Elva Escobar Briones, D., López López, V., Patricia Muñoz Sevilla, D., Pedrozo Acuña, A., Sheinbaum Pardo, J., Brigitta van Tussenbroek, D. I., Zavala Hidalgo Servicio Meteorológico Nacional Gilberto Acosta González, J., Dalila Aldana Aranda, D., Alfredo Arellano Guillermo, B., Arellano Verdejo, J., Rebeca Betancourt Galindo, D., Bravo Quezada, A., Buitrón Méndez, G., Adán Caballero Vázquez, J., Ligia Collado Vides, D., Díaz Martínez, S., José Espinoza González, C., ... Roo, Q. (n.d.). *Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México 1 Agenda de ciencia, tecnología e innovación*.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science*, 364(6448), 83–87. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAW7912/SUPPL_FILE/AAW7912S1.GIF