

## Presentación de proyecto de investigación ante Consejo Divisional de la DCNI

Fecha de presentación del proyecto	
Sesión de Consejo de aprobación	
Clave del proyecto asignada por Consejo Divisional	

### Título del Proyecto:

Desarrollo de tecnologías de procesamiento para la valorización de biomásas y residuos con alto impacto ambiental

### Línea de investigación del Grupo de Investigación:

Modelado y simulación en ingeniería de procesos

### Responsable y participantes:

Responsable: Dra. María Teresa López Arenas (Departamento de Procesos y Tecnología, División de Ciencias Naturales e Ingeniería, UAM-Cuajimalpa)

Participante: Dr. Alfonso Mauricio Sales Cruz (Departamento de Procesos y Tecnología, División de Ciencias Naturales e Ingeniería, UAM-Cuajimalpa)

### Orientación:

- Investigación básica (x)
- Investigación aplicada (x)
- Desarrollo o adaptación ( )
- Transferencia de tecnología ( )
- Desarrollo de tecnología (x)
- Otros ( ), especificar: \_\_\_\_\_

**Fecha de inicio:** 1º de julio de 2024

**Duración:** 3 años

## CONVOCATORIA CIENCIA BÁSICA Y DE FRONTERA 2023-2024

### **Desarrollo de tecnologías de procesamiento para la valorización de biomásas y residuos con alto impacto ambiental**

RESPONSABLE: DRA. MARIA TERESA LÓPEZ ARENAS  
COLABORADOR: DR. ALFONSO MAURICIO SALES CRUZ  
INSTITUCIÓN: Departamento de Procesos y Tecnología  
División de Ciencias Naturales e Ingeniería  
UAM-Cuajimalpa

#### **RESUMEN EJECUTIVO**

Actualmente el cambio climático tiene efectos importantes en el medio ambiente (como desastres naturales, degradación de hábitat, etc.), y además impactan nuestra economía, salud y bienestar. El calentamiento global, la emisión de gases de efecto invernadero y en general la crisis climática son temas controversiales, ya que deben abordarse desde distintos ámbitos sociales, políticos, ambientales e industriales. De hecho, el acuerdo alcanzado en la cumbre de las Naciones Unidas sobre el cambio climático de este año 2023, la COP28 en Dubái, insta a los países a cambiar rápidamente sus sistemas energéticos de forma justa y ordenada. Un compromiso es la transición al uso de energías limpias, pero también se puede contribuir mediante procesos productivos industriales que reduzcan el consumo energético, disminuyan sus emisiones, y minimicen el consumo de agua.

Desde el ámbito de ingeniería de procesos, este proyecto de investigación propone desarrollar de tecnologías innovadoras y avanzadas para la valorización de biomásas y residuos con alto impacto ambiental, para ofrecer procesos industriales sostenibles (esto es garantizando el equilibrio entre economía, medio ambiente y bienestar social).

Por una parte, existen biomásas generadas por el cambio climático (como son los arribazones de sargazo en las costas de Caribe), biomásas generadas por los residuos sólidos urbanos (principalmente materiales eliminados de las casas-habitación o vía pública), biomásas generadas de los residuos agroindustriales (como son rastrojos y bagazos), entre otras.

Por otra parte, la economía lineal (cuyo concepto es producir-usar-desechar) está siendo sustituida por el nuevo enfoque de la economía circular que promueve reducir-reutilizar-reciclar. De manera que las biorrefinerías son alternativas de procesamiento, alineadas a la economía circular, mediante la transformación de biomasa en una gama de productos comercializables y energía.

#### **OBJETIVOS**

##### **OBJETIVOS GENERAL**

Desarrollar y evaluar de manera integral diferentes rutas tecnológicas para la valorización de tres biomásas y/o residuos que actualmente tienen un alto impacto ambiental (sargazo, FORSU: fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, y bagazo de caña de azúcar) mediante simulación y herramientas de ingeniería de procesos, desde un enfoque de economía circular e impacto ambiental.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

**OBJETIVO 1 - VALORIZACIÓN DE SARGAZO:** Proponer y evaluar el diseño conceptual de una biorrefinería de sargazo, mediante diferentes rutas tecnológicas que permitan producir alginato, PHB, ácido láctico y biofertilizante. Se considerará el caso de estudio de una playa del Caribe Mexicano.

**OBJETIVO 2 - VALORIZACIÓN DE LA FORSU:** Proponer y evaluar el diseño conceptual de una biorrefinería de digestión anaerobia de la FORSU (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos), mediante diferentes rutas tecnológicas que permitan producir biogás, biodiesel, ácido láctico y biofertilizante. Se considerará el caso de estudio de la FORSU generada en la Ciudad de México.

**OBJETIVO 3 - VALORIZACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR:** Proponer y evaluar el diseño conceptual de una biorrefinería de residuos lignocelulósicos como una etapa productiva de un ingenio azucarero, mediante diferentes rutas tecnológicas que permitan producir ácido cítrico, lisina y biofertilizante. Se considerará el caso de estudio de un ingenio azucarero del estado de Veracruz.

**OBJETIVO 4 – EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS BIORREFINERÍAS:** Evaluación de la inversión, tasa y período de recuperación de la inversión para determinar la factibilidad y rentabilidad de las rutas tecnológicas; así como cuantificar criterios de evaluación sobre el impacto ambiental.

## DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

En esta propuesta se pretende responder preguntas como:

- (a) Si las biomasas o residuos no deseables se eliminan por incineración para la cogeneración de energía eléctrica: ¿cuánta energía se generaría y qué impacto ambiental implica?
- (b) ¿Cuáles son las posibles rutas tecnológicas y los productos de valor agregado que se podrían obtener del sargazo considerando el caso del Caribe Mexicano?
- (c) ¿Qué rutas de procesamiento de la FORSU (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos) serían factibles, rentables y sostenibles para las grandes cantidades generadas en la Ciudad de México (CDMX)?
- (d) ¿Cuáles son las tecnologías de reconversión/modernización de los ingenios azucareros mexicanos usando sus biomasas (jugo de caña y melaza) y sus residuos (bagazo de caña), para incrementar su rentabilidad y reducir las emisiones de gases efecto invernadero?

Las rutas tecnológicas se enfocarán a procesos sustentables como son los procesos biotecnológicos mediante la síntesis y diseño de biorrefinerías, tal que se desarrollarán módulos de procesamiento (por simulación) para etapas comunes a los casos de estudio. Esto es, los módulos comunes de las biorrefinerías son (Figura 1): preparación del medio de cultivo, pretratamiento, sacarificación y fermentación. Mientras que los módulos específicos para cada biorrefinería serían la extracción de alginato para el caso del sargazo, la digestión anaerobia para el caso de la FORSU, o las etapas de purificación para cada producto seleccionado.

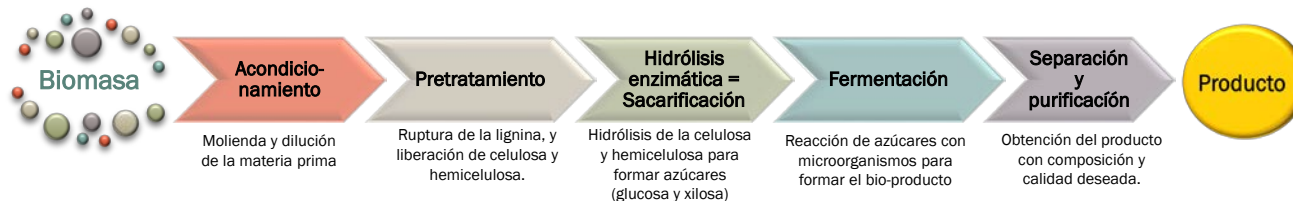


Figura 1. Módulos de procesamiento en una biorrefinería.

## ANTECEDENTES

El manejo inadecuado de residuos sólidos genera serios problemas ambientales como malos olores por su descomposición, contaminación de agua y suelo, proliferación de fauna nociva transmisora de enfermedades, problemas de salud, daño del hábitat, etc. En ocasiones, una solución para la eliminación de residuos sólidos ha sido la incineración, la cual a gran escala puede aprovecharse para la generación de energía eléctrica. No obstante, la incineración produce emisiones tóxicas al aire (dióxido de carbono, metales, dioxinas, furanos, gases ácidos y partículas), generando otro problema de contaminación. Bajo esta premisa, se identificaron algunas biomásas y residuos que tiene alto impacto ambiental: el sargazo (un alga parda generada en exceso por el cambio climático y encontrada en las costas del Caribe), la FORSU (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos) y el bagazo de caña (un residuo lignocelulósico generado en los ingenios azucareros). Estas tres biomásas pueden ser valorizadas en una gama amplia de productos (aminoácidos, biopolímeros, bioenergía, etc.), como se muestra en la Figura 2.

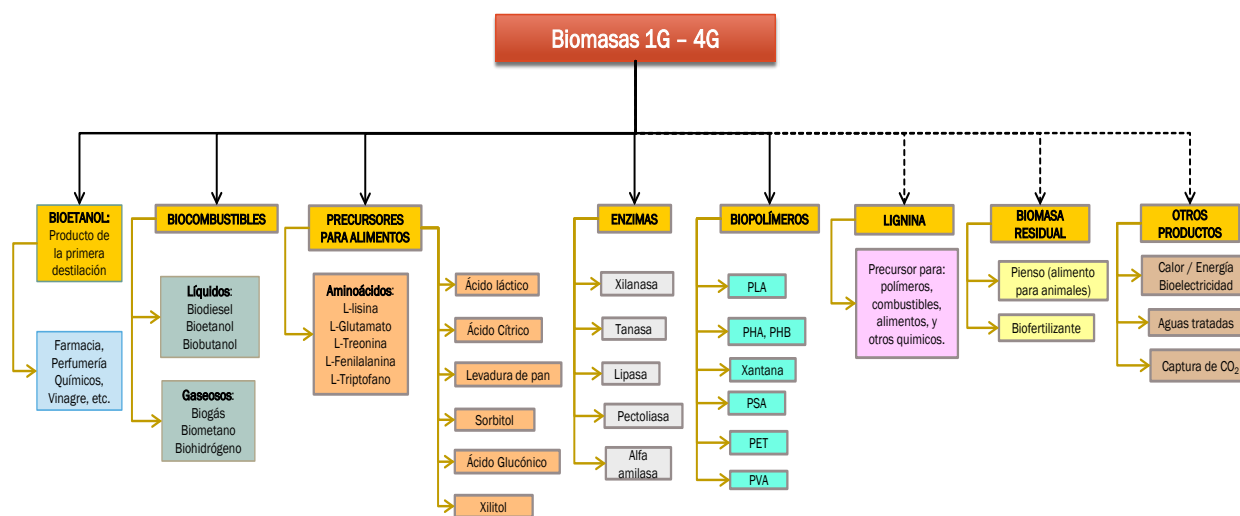


Figura 2. Gama de productos que pueden ser generados en las biorrefinerías.

El grupo de investigación de la Dra. Teresa López Arenas se ha enfocado en los últimos años al desarrollo de biorrefinerías de primera y segunda generación a partir de melaza (López-Arenas et al., 2022) y residuos lignocelulósicos (González-Contreras et al., 2021), respectivamente. Y recientemente se iniciaron estudios preliminares con otras biomásas poco estudiadas como son los champiñones no comercializables (Lázaro-Molina & López-Arenas, 2023) y el sargazo (Flores-Mendoza & López-Arenas, 2023). No obstante, en la mayoría de estos estudios se consideró solo un producto para cada biomasa, y en general quedaron

interrogantes por investigar: (a) analizar otras configuraciones de procesos, ya sean alternativas de procesamiento corriente arriba o corriente abajo; (b) proponer la optimización de las condiciones de operación, principalmente de los reactores enzimáticos y de cultivo celular; (c) evaluar diferentes capacidades instaladas, es decir, procesar mayores cantidades de biomasa, pero tomando en cuenta la disponibilidad de la biomasa en la región, la logística y costo de transporte; (d) estudiar opciones de biorrefinerías multi-producto, entre otros aspectos.

Con estos precedentes, se cuenta con experiencia para abordar el tema propuesto de desarrollo de tecnologías de procesamiento para valorización de biomásas y residuos con alto impacto ambiental, para generar una superestructura de rutas tecnológicas, módulos de procesamiento, estrategias de evaluación técnica-económica-ambiental, y criterios para la toma de decisiones en etapas tempranas del diseño de una biorrefinería.

### **Hipótesis o pregunta(s) de investigación**

La valorización de biomásas o residuos mediante el desarrollo de diferentes rutas tecnológicas de producción (vía simulación de procesos) permitirán vislumbrar algunas de las barreras para su implementación industrial; asimismo permitirá determinar los productos con valor agregado más rentables junto con la obtención de rutas de procesamiento fidedignas. Además, se promueven los paradigmas de la economía circular al reducir-reutilizar-reciclar residuos, tomando en cuenta la sostenibilidad de los procesos.

### **Metodología**

El reto está en desarrollar e implementar estrategias de síntesis-evaluación-análisis, basadas en herramientas de modelado y simulación de ingeniería de procesos, para maximizar los rendimientos y productividades en las etapas reactivas, aumentar la velocidad de producción, reducir el consumo energético, disminuir emisiones/residuos y minimizar costo de producción. Además, la metodología propuesta deberá dar guías para determinar cuáles de los productos seleccionados que permitan que una biorrefinería sea rentable y sustentable. A continuación, se describe brevemente la metodología a emplear.

#### *Síntesis, diseño y análisis de la operación de la biorrefinería*

Se establecerá un diseño conceptual de la biorrefinería mediante la caracterización de cada una de las etapas para cada una de las biomásas propuestas. Posteriormente, se establecerán diferentes rutas de síntesis (superestructuras de módulos factibles), y se analizarán para determinar las rutas con mayor potencial para su evaluación. La evaluación técnica considerará el modelado en términos de especies, mecanismos cinéticos, modelos de separación, integración de calor (punto de pliegue), etc. Se incluirán tiempos de procesamiento, de limpieza, muertos, de carga y descarga, para la evaluación de tiempos y movimientos de la biorrefinería a escala industrial. El estudio evaluará el impacto de las condiciones de operación sobre el rendimiento, rentabilidad y sostenibilidad de la biorrefinería. Se realizarán análisis de sensibilidad paramétrica y operacional de acuerdo con la cantidad disponible de cada biomasa o residuo.

#### *Evaluación económica de las biorrefinerías*

Esta evaluación considerará el enfoque de economía circular y apoyará la toma de decisiones en el diseño y operación del proceso de producción. Las medidas de rentabilidad desempeñan un papel crucial durante

todo el proceso para ayudar a seleccionar sus mejores alternativas para el diseño del proceso. Aquí se seleccionan las medidas de rentabilidad como: costo unitario de producción, tasa de retorno de inversión y período de retorno. Estos criterios de rentabilidad proporcionan una visión instantánea de la economía del proceso y se utilizan a menudo para estimaciones preliminares cuando se comparan diferentes diagramas de flujo durante la etapa de síntesis del diseño del proceso. También se emplearán criterios de rentabilidad más rigurosos, en los que se considere el flujo de efectivo (como el valor actual neto, NPV) para que se pueda tomar una decisión final sobre la viabilidad financiera de un proceso.

#### *Evaluación del impacto ambiental y criterio global de evaluación de las biorrefinerías*

Se evaluarán dos tipos de indicadores de impacto ambiental:

- (1) Cuantificación de las cantidades de energía eléctrica y de los gases de efecto invernadero emitidos considerando el proceso de cogeneración de energía (esto es, mediante la incineración de las biomásas propuestas). Estos resultados se tomarán como referencia para contrastar los resultados de incineración de sólidos contra los resultados de valorización de las biomásas usando biorrefinerías.
- (2) Cuantificación de indicadores ambientales definidos por: (a) el consumo de agua de proceso, ya que altos consumos pueden impactar en la escasez de agua y la degradación de los ecosistemas; (b) las emisiones de gases de efecto invernadero, para reducir su impacto negativo en el medio ambiente; (c) el consumo de energía, para reducir la energía proveniente de combustibles fósiles debido a su impacto sobre el calentamiento global, (d) el consumo de agentes de transferencia de calor (agua de calentamiento/enfriamiento y vapor), para reducir su consumo y/o realizar integración de calor al proceso.

Por último, se propondrá una metodología de evaluación global usando todos los indicadores evaluados en las etapas anteriores (técnicos, económicos y ambientales), tal que el criterio global de evaluación de las biorrefinerías permita seleccionar rutas de procesamiento que tengan un equilibrio de sostenibilidad.

### **Resultados esperados**

#### Resultados técnicos:

- (a) Proponer alternativas tecnológicas para la valorización de las tres biomásas propuestas: sargazo, FORSU y bagazo de caña de azúcar.
- (b) Determinar diseños conceptuales de las biorrefinerías usando cada una de las biomásas, definiendo los mejores productos con valor agregado.
- (c) Obtener módulos de producción (vía simulación) que permitan construir las biorrefinerías y evaluarlas tal que sean factibles, rentables y sostenibles.

#### Resultados académicos:

- (a) Propuesta de soluciones a problemas reales de biomásas cuyo manejo inadecuado provoca serios problemas ambientales, promoviendo el paradigma de una economía circular.
- (b) Consolidación del área de modelado y simulación en Ingeniería de Sistemas de Bioprocesos del Departamento de Procesos y Tecnología (UAM-Cuajimalpa).
- (c) Formación de alumnos de licenciatura y posgrado en el área de Ingeniería de Bioprocesos.

## Metas

Las metas cuantificables planeadas por etapa se muestran en la siguiente tabla:

Meta	Etapa 1 (2024)	Etapa 2 (2025)	Etapa 3 (2026)
<b>Productos académicos</b>			
Publicación de artículos en revistas indizadas	1	2	2
Ponencias en congresos nacionales	2	2	2
Ponencias en congresos internacionales	1	1	1
<b>Acceso universal del conocimiento</b>			
Conferencias y/o seminarios	1	1	1
Infografías informativas	2	2	2
Videos o webinarios de difusión	1	1	1
<b>Formación de recursos humanos</b>			
Dirección de proyectos terminales de licenciatura	1	1	1
Dirección de tesis de posgrado	-	1	2

## INFRAESTRUCTURA DISPONIBLE

El Laboratorio Virtual de Ingeniería de Procesos (LaVIP) ubicado en el piso 7 de la Torre III de la UAM-Cuajimalpa) cuenta principalmente con hardware (computadoras personales y servidores) y software especializado para simulación de procesos (Aspen Suite Engineering, SuperPro Designer, Mathematica, LabView, entre otros). Parte del presupuesto solicitado será para renovar equipo de cómputo y actualizar las licencias de software especializado.

## CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
Determinación de las composiciones de las biomásas			
Síntesis de las biorrefinerías mediante superestructuras			
Selección de las rutas tecnológicas para su diseño en simuladores de proceso			
Evaluación técnica de la operabilidad factible de las biorrefinerías			
Implementación del modelo económico para evaluar la rentabilidad de las biorrefinerías			
Evaluación económica de varios escenarios de nivel industrial (capacidad instalada, modo de operación, etc.)			
Análisis de sensibilidad paramétrica para determinar las biorrefinerías más rentables			
Implementación de los algoritmos de evaluación de impacto ambiental.			
Evaluación del impacto ambiental de las biorrefinerías seleccionadas.			
Desarrollo e implementación de indicadores de sostenibilidad que permitan la integración de los criterios técnicos, económicos, ambientales.			
Reporte final del proyecto			

## RESUMEN DEL PRESUPUESTO

ETAPA 1: 2024		
TIPO	RUBRO	total
corriente	Software especializado (compra de licencias)	\$254,000
corriente	Publicación de artículos en revistas	\$30,000
corriente	Estancias técnico-académicas para alumnos participantes (gastos de pasajes, hospedaje y alimentación)	\$20,000
corriente	Trabajo de campo: Encuestas y observaciones (gastos de pasajes, hospedaje y alimentación)	\$61,500
corriente	Materiales de uso directo (consumibles)	\$20,000
Inversión	Equipo de cómputo especializado	\$80,000
<b>TOTAL</b>		<b>\$465,500</b>

ETAPA 2: 2025		
TIPO	RUBRO	total
corriente	Software especializado (compra de licencias)	\$70,000
corriente	Publicación de artículos en revistas	\$30,000
corriente	Gastos para asistencia a congresos nacionales (Cuotas de inscripción, pasajes y viáticos)	\$75,000
corriente	Gastos para asistencia a congresos internacionales (Cuotas de inscripción, pasajes y viáticos)	\$89,000
corriente	Estancias técnico-académicas para alumnos participantes (gastos de pasajes, hospedaje y alimentación)	\$30,000
corriente	Materiales de uso directo (consumibles)	\$20,000
<b>TOTAL</b>		<b>\$314,000</b>

ETAPA 3: 2026		
TIPO	RUBRO	total
corriente	Software especializado (renovación de licencias)	\$190,000
corriente	Publicación de artículos en revistas	\$30,000
corriente	Gastos para asistencia a congresos nacionales (Cuotas de inscripción, pasajes y viáticos)	\$75,000
corriente	Gastos para asistencia a congresos internacionales (Cuotas de inscripción, pasajes y viáticos)	\$91,000
corriente	Materiales de uso directo (consumibles)	\$20,000
<b>TOTAL</b>		<b>\$406,000</b>

RESUMEN PRESUPUESTAL	MONTO
ETAPA 1	\$465,500
ETAPA 2	\$314,000
ETAPA 3	\$406,000
<b>PRESUPUESTO SOLICITADO</b>	<b>\$1'185,500</b>



## Bibliografía

- Fitzpatrick, M., Champagne, P., Cunningham, M., Whitney, R. (2010). A biorefinery processing perspective: treatment of lignocellulosic materials for the production of value-added products. *Bioresource Technology*, 101, 8915-8922.
- Flores-Mendoza, O., Lopez-Arenas, T. (2023) Conceptual Design of a Biorefinery to Use Brown Seaweed *Sargassum*, *Computer Aided Chemical Engineering*, 52, 2369-2374.
- Gonzalez-Contreras, M., Lugo-Mendez, H., Sales-Cruz, M., Lopez-Arenas, T. (2021) Synthesis, design and evaluation of intensified lignocellulosic biorefineries - Case study: Ethanol production, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 159, 108220, 1-13.
- Heinzle, E., Weirich, D., Brogli, F., Hoffmann, V., Koller, G., Verdyun, M., Hungerbuehler, K. (1998) Ecological and economic objective functions for screening in integrated development of fine chemical processes. 1. Flexible and expandable framework using indices. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, 3395–3407.
- Hernández, R. (2019). La amenaza de los tiraderos clandestinos de sargazo. Recuperado 5 de diciembre de 2023, de <https://piedepagina.mx/la-amenaza-de-lo-tiraderos-clandestinos-de-sargazo/>
- Lazaro-Molina, B.I., Lopez-Arenas, T. (2023) Waste valorization of non-commercialized edible mushrooms, *Computer Aided Chemical Engineering*, 52, 2339-2344.
- Lopez-Arenas, T., Anaya-Reza, O., Perez-Cisneros, E.S., Sales-Cruz, M. (2022) 19 - Conceptual design of sugarcane biorefinery upgrading molasses to value-added chemicals, Editor(s): Nuttha Thongchul, Antonis Kokossis, Suttichai Assabumrungrat, *A-Z of Biorefinery*, Elsevier, 683-712.
- Seider, W.D., Seader, J.D., Lewin, D.R. (2009) *Product & Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*. John Wiley & Sons, New York.
- Young, D.M., Cabezas, H. (1999) Designing sustainable processes with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm. *Computers & Chemical Engineering* 23, 1477-1491.