

# **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

Evaluación de sistemas piloto de AS y UASB para el aprovechamiento de efluentes tratados de aguas residuales domesticas de Cúcuta (Norte de Santander) en cultivos de *Chlorella* sp., mediante la metodología del análisis de ciclo de vida

Michael Edgardo Pérez Roa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Química

Director

M. Eng Crisóstomo Barajas Ferreira

Magister en Ingeniería química

Codirectora

M.Eng Janet Bibiana García Martínez

Magister en Ingeniería química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

# **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

## **Dedicatoria**

Esta dedicatoria va dirigida a la mujer que empleó todas sus fuerzas para apoyarme a lo largo del camino, quien con su incasable voluntad y cariño me motivó aun cuando ni yo mismo creí que pudiera alcanzar esta meta. Este fruto no es solo de mi esfuerzo, sino del tuyo también, mamá.

# **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

## **Agradecimientos**

Gracias a Dios, porque sé que, en medio del ruido, su luz siempre me ha traído paz y fortaleza.

Gracias a mi director, el profesor Crisóstomo Barajas Ferreira y a mi codirectora, Janet Bibiana García Martínez, por incubar esta idea de proyecto y permitirme hacerla crecer.

A la Universidad Industrial de Santander y la escuela de ingeniería química, por el apoyo económico y la calidad humana del talento docente y administrativo. De igual forma al grupo de investigación CIDES, por las oportunidades brindadas y el acompañamiento en cada etapa.

A la Universidad Francisco de Paula Santander, en cuyos laboratorios se desarrolló la fase experimental del trabajo de investigación.

Agradecimientos especiales a los profesores Andrés Fernando Barajas Solano y Néstor Andrés Urbina Suarez, quienes apoyaron de forma incondicional la investigación y cuyos aportes enriquecieron mis perspectivas.

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
Estado del Arte.....	19
1.1. Producción bibliográfica y su comportamiento en el tiempo .....	20
1.2. Producción bibliográfica de acuerdo con territorio o país .....	23
1.3. Producción bibliográfica para el tratamiento de aguas residuales municipales.....	26
1.4. Producción bibliográfica de microalgas cultivadas en aguas residuales .....	28
Objetivos.....	35
1.5. Objetivo general.....	35
1.6. Objetivos específicos .....	35
Metodología .....	36
1.7. Alcance .....	37
1.7.1. Delimitación del sistema.....	37
1.8. Fase 1: Análisis de los flujos de materia y energía.....	40
1.8.1. Caracterización del agua residual .....	41
1.9. Fase 2: Evaluación de los impactos del ciclo de Vida (EICV) .....	41
1.9.1. Definición de categorías de impacto.....	41
1.9.2. Clasificación. ....	42
1.9.3. Caracterización .....	43
1.10. Fase 3: Determinación del sistema potencialmente sostenible.....	43
Resultados y discusión.....	44

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

1.11.	Fase 1: Análisis de los flujos de materia y energía.....	44
1.11.1.	Diagramas de flujo.....	44
1.11.2.	Caracterización del agua residual .....	45
1.12.	Fase 2: Evaluación de los impactos del ciclo de Vida (EICV).....	50
1.12.1.	Escenario 1 (AS) y 2 (AS+M) .....	50
1.12.2.	Escenario 3 (UASB) y 4 (UASB+M) .....	54
1.12.3.	Impactos potenciales del vertimiento.....	58
1.12.4.	Biomasa de Microalgas.....	60
1.13.	Fase 3: Análisis de sensibilidad e incertidumbre .....	62
1.13.1.	Análisis de incertidumbre .....	62
1.13.2.	Análisis de sensibilidad.....	66
	Conclusiones.....	71
	Recomendaciones .....	73
	Referencias Bibliográficas .....	75
	Apéndices.....	112

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Información de los ACV desarrollados en torno a tratamiento de aguas residuales y microalgas</i> .....	31
Tabla 2. <i>Categorías de impacto</i> .....	42
Tabla 3. <i>Parámetros fisicoquímicos de los afluentes y efluentes</i> .....	45
Tabla 4. <i>Balance de masa y energía del sistema de Lodos activados (AS)</i> . ....	46
Tabla 5. <i>Balance de masa y energía del sistema de reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)</i> .....	47
Tabla 6. <i>Resumen de inventario</i> .....	48
Tabla 7. <i>Parámetros de incertidumbre</i> . ....	63
Tabla 8. <i>Parámetros para el análisis de sensibilidad</i> .....	66

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Cantidad de documentos publicados con relación a ACV, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2022.....	21
Figura 2. Áreas temáticas con relación a ACV, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2022.....	22
Figura 3. Documentos publicados por territorio o país con relación a ACV, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2022.....	25
Figura 4. Fases del ACV.....	36
Figura 5. Diagrama de flujo del sistema de aprovechamiento de aguas residuales domésticas. ..	37
Figura 6. Diagrama de flujo para escenarios 1 y 2.....	44
Figura 7. Diagrama de flujo para escenarios 3 y 4.....	44
Figura 8. Normalización de impactos Ambientales potenciales de los escenarios 1 y 2.....	51
Figura 9. Normalización de escenarios con reúso de lodo en exceso como fertilizante.....	53
Figura 10. Normalización de impactos ambientales de los escenarios 3 y 4.....	55
Figura 11 Normalización de escenarios con aprovechamiento de metano como fuente de energía. .....	57
Figura 12. Normalización Impactos ambientales potenciales generados por la descarga de agua residual doméstica.....	58
Figura 13. Normalización de impactos ambientales potenciales de la producción de biomasa. ..	62
Figura 14. Desviación estándar de los escenarios.....	63
Figura 15. Desviación estándar delo escenario con aprovechamiento de residuo/emisión.....	64
Figura 16. Desviación estándar de impactos potenciales de la producción de biomasa.....	65

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

Figura 17. Sensibilidad de los escenarios 1 y 2. ....	67
Figura 18. Sensibilidad escenarios 1 y 2 con reúso de lodo en exceso como base fertilizante. ...	68
Figura 19. Sensibilidad de los escenarios 3 y 4 .....	68
Figura 20. Escenarios 3 y 4 con aprovechamiento de metano. ....	69
Figura 21. Sensibilidad se impactos ambientales generados por en la producción de biomasa. ..	70

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

Resumen

**Título:** Evaluación de sistemas piloto de lodos activados y UASB para el aprovechamiento de efluentes tratados de aguas residuales domésticas de Cúcuta (Norte de Santander) en cultivos de *Chlorella* sp., mediante la metodología del análisis de ciclo de vida\*

**Autor:** Michael Edgardo Pérez Roa\*\*

**Palabras Clave:** Análisis de ciclo de vida, Tratamiento de aguas residuales, Sistema piloto, reactor anaerobio de flujo ascendente, Lodos activados

**Descripción:** El presente trabajo de investigación aplicó la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), como herramienta dinámica para determinar los impactos ambientales potenciales durante la operación de dos sistemas piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas generadas en el centro poblado San Pedro, perteneciente al departamento de Norte de Santander. Se evaluaron dos escenarios de tratamiento convencional de aguas residuales domésticas, lodos activados (AS) y reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y sus respectivos acoples con cultivos de microalgas, buscando aplicar una perspectiva no solo de refinamiento del efluente final, sino también para la obtención de biomasa, en el marco del concepto de economía circular, ya que esta puede ser usada para satisfacer otros sistemas productivos gracias a su versatilidad funcional. Se observó que el consumo eléctrico es el principal potenciador de impactos ambientales en todos los escenarios, afectando significativamente las siguientes cuatro categorías de impacto, toxicidad carcinogénica en humanos (TCH), ecotoxicidad en agua dulce (EcAD), ecotoxicidad marina (EcM) y eutrofización de agua dulce (EAD), sin embargo, los impactos pueden ser mitigados incluyendo la reutilización de productos del mismo sistema, implementando equipos ahorradores, mejorando las variables de operación o aplicando fuentes de energía más limpias ajenas a la matriz eléctrica.

---

\* Proyecto de investigación de Maestría.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química.

Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Magister en ingeniería química. Codirector: Janet Bibiana García Martínez.  
Magister en ingeniería química

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

Abstract

**Title:** Evaluation of pilot systems of activated sludge and UASB for the use of treated effluents of domestic wastewater from Cúcuta (Norte de Santander) in *Chlorella* sp. crops, through the life cycle analysis methodology\*

**Author(s):** Michael Edgardo Pérez Roa \*\*

**Key Words:** Life Cycle Assessment, Wastewater Treatment, Pilot System, Upflow Anaerobic Reactor, Activated Sludge.

**Description:** This project applied the life cycle analysis (LCA) methodology, as a dynamic tool to determine the potential environmental impacts during the operation of two pilot systems for the treatment of domestic wastewater generated in the San Pedro town, belonging to the North Santander region. Two scenarios of conventional domestic wastewater treatment activated sludge (AS) and upflow anaerobic reactor (UASB), and their respective couplings with microalgae cultures were evaluated, seeking to apply a perspective not only to refine the final effluent, but also to obtaining biomass, within the framework of the circular economy concept, since it can be used to satisfy other production systems thanks to its functional versatility. It was observed that electricity consumption is the main enhancer of environmental impacts in all scenarios, significantly affecting the following four impact categories: carcinogenic toxicity in humans, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, and freshwater eutrophication; however, impacts can be mitigated by including the reuse of products from the same system, implementing saving equipment, improving operating variables or applying cleaner energy sources outside the electrical matrix.

---

\* Master's research project

\*\* Faculty of Physical Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, Master in Chemical Engineering. Director: Crisostomo Barajas Ferreira. Master in chemical engineering. Co-director: Janet Bibiana García Martínez. Master in chemical engineering

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Introducción

Las aguas residuales son líquidos complejos cuya composición biológica y fisicoquímica varía dependiendo de su fuente de origen, generalmente poseen altas cantidades de compuesto orgánicos disueltos, microorganismos, sólidos suspendidos y metales pesados entre otros contaminantes (Mogens Henze et al., 2008). Por lo anterior, los vertimientos representan un riesgo ambiental para los ecosistemas, los servicios que estos prestan e influyen directamente en la disponibilidad del agua, agravando el estrés hídrico a razón del cambio climático (Haddeland et al., 2014; IPCC, 2018).

Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales involucran gran variedad y combinación de sistemas biológicos y fisicoquímicos. Los criterios de implementación están intrínsecamente relacionados a la composición del efluente residual y los requerimientos de remoción. Recientemente se evidencia la investigación y mejoramiento constante de todos los sistemas tradicionales y la implementación de sistemas de tratamiento híbridos para mejorar la calidad del caudal de forma eficiente buscando la mitigación de impactos ambientales.

El uso de tratamientos fisicoquímicos como la coagulación-floculación se reporta para el tratamiento de efluentes en la producción de aceite de palma (Mohamad et al., 2021; Zhao et al., 2021), aguas residuales de lavandería (de Oliveira Cardoso Nascimento et al., 2021) y separación de iones metálicos en aguas residuales industriales y municipales (Ida et al., 2021; López-Maldonado et al., 2021). La adsorción y el intercambio iónico se proyectan con efectividad para separar iones de Au(III), Cu(II), Co(II) y Ni(II) en aguas residuales (Guo et al., 2021; X. Zhang et al., 2021), remoción y recuperación de fósforo (Ownby et al., 2021), remoción de colorantes orgánicos tóxicos en efluentes residuales de industria textil (Mondal et al., 2021; Sricharoen et al.,

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

2021) e incluso como mecanismos para la retención de U(VI) radiactivo en un nanocompuesto de bio-carbón de hidroxiapatita (W. Ahmed et al., 2021). Las membranas actualmente son objeto de desarrollo tecnológico como superficies capaces de soportar la oxidación catalítica de compuestos orgánicos y desalinización de aguas residuales (P Li et al., 2021; Naseem et al., 2021). Los tratamientos electroquímicos han sido empleados como un método eficiente y de bajo costo para el mejoramiento de cuerpos de agua eutrofizados (M. Chen et al., 2021), remoción de antibióticos residuales (V. Choudhary et al., 2021), tratamiento de aguas residuales de plantas de aprovechamiento bovino, productos lácteos y colorantes (Muthumanickam et al., 2021; Sandoval et al., 2021).

Los tratamientos biológicos generalmente se enfocan en mantener una concentración adecuada de oxígeno disuelto a través de la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos que pueden ser directamente tóxicos para los ecosistemas acuáticos y todas las formas de vida que se abastecen de estos (Grady et al., 2011). En estudios recientes para estos tratamientos, se reporta la capacidad de remoción del RNA de coronavirus respiratorio agudo severo 2 (SARS-CoV-2) con sistemas de lodos activados convencionales (M. Kumar et al., 2021) y sinergia con otras tecnologías y/o procesos para la remoción de fósforo y nitrógeno (Sodhi et al., 2021; Xu et al., 2021), producción de ácidos grasos volátiles (He et al., 2021), metano y solubilización de la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y compuestos macromoleculares refractarios (Mohammad Mirsoleimani Azizi et al., 2021). De igual manera, otros sistemas de tratamiento como las lagunas, han sido empleados en el mejoramiento de la calidad de aguas residuales de plantas de aprovechamiento bovino (Musa et al., 2021) y remoción de fósforo de aguas residuales domésticas en unión con humedales artificiales (Karpisek et al., 2021; Omidinia-Anarkoli et al., 2021), los cuales involucran los procesos fotosintéticos realizados

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

por plantas macrófitas para apoyar la técnica de biorremediación, reportándose su uso en el tratamiento de efluentes residuales de molienda y procesamiento de café (Said et al., 2021), aguas residuales textiles (Tasneem et al., 2021), remoción de Cr(VI) (Masinire et al., 2021), productos farmacéuticos y de cuidado personal, pesticidas y metales pesados entre otros (Al-Baldawi et al., 2021; Brunhoferova et al., 2021; Nugroho et al., 2021).

Los microorganismos fotosintéticos, como microalgas y cianobacterias, también han sido objeto de estudio en procesos de fitorremediación, logrando altas eficiencias de remoción de la carga contaminante en aguas residuales piscícolas (Cardoso et al., 2021; Posadas et al., 2015) porcícolas (Wu et al., 2020), avícolas (Oliveira et al., 2019), de industria textil (Fazal et al., 2021), industria minera (Y. Li et al., 2019) y lixiviados de relleno sanitario (Chang et al., 2019; Porto et al., 2021; Viegas et al., 2021; Zuhra et al., 2021), demostrando capacidad de adsorción de metales pesados (Bauenova et al., 2021; T. Liu et al., 2021; Plöhn et al., 2021; Sun et al., 2019). Las microalgas eventualmente podrían estar involucradas en todos los tratamientos de aguas residuales gracias a sus capacidades de aliviar la carga contaminante de difícil degradación, sin embargo, las desventajas de su implementación yacen en los costos de cultivo, es por esto por lo que se estudia la forma de subsanarlos empleando aguas residuales como fuente nutricional. Adicionalmente la biomasa de las microalgas puede ser refinada para la obtención de varios bio-productos de alto interés industrial (Dayana Priyadharshini et al., 2021; Kholssi et al., 2021). Actualmente se plantean sistemas de biorremediación que buscan simultáneamente la remoción de carga contaminante y la producción de biomasa para la extracción de metabolitos (Dogaris et al., 2019; Hernández-García et al., 2019; S. Li et al., 2019; Y Su et al., 2021). La producción lipídica de las microalgas se propone como una forma alternativa de obtención de biodiesel, ya que, no solo los requerimientos de suelo y de agua son flexibles, sino que también la eficiencia de transformación

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

de energía solar en biomasa es más rápida comparada con cultivos de semillas oleaginosas, ubicando a estos microorganismos como materia prima sustentable para la producción de biodiesel con potencial de contribución al mercado de los combustibles, sin embargo, el costo de producción aún sigue siendo elevado en comparación con sus competidores fósiles (Chia et al., 2018; Z. Hu et al., 2019). La biomasa de microalgas también cuenta con aplicaciones en la industria alimentaria, puesto que, tiene potencial como emulsificador (Silva et al., 2021) y suplemento nutricional debido a su contenido de proteínas aminoácidos, minerales, ácidos grasos poliinsaturados y vitaminas (R. Bai et al., 2021; Siahbalaei et al., 2021), así mismo, ha sido usada como materia prima de alimento para la producción ganadera, avícola y piscícola (Alagawany et al., 2021; Saadaoui et al., 2021). La industria farmacéutica y cosmética también ha puesto su interés en otros bio-productos derivados de las microalgas, ya que estas son capaces de producir polisacáridos libres de metales pesados con capacidad de promover la generación de colágeno I y con potencial antialérgico, cicatrizante, antioxidante y antitumoral (Elkomy et al., 2021; Miguel et al., 2021; Tseng: et al., 2021), así como compuestos bio-estimulantes que mejoran la respuesta defensiva de plantas al estrés biótico (Rachidi et al., 2021). Los pigmentos fabricados por las células en los procesos fotosintéticos también son investigados para la explotación comercial, ya que han demostrado tener propiedades antioxidantes, anti inflamatorias, anticancerígenas, neuro y hepático protectoras (S. Li et al., 2019)

A partir de la segunda década de los años 2000, las biorrefinerías de biomasa de microalgas han surgido como una forma exitosa de optimizar los cultivos y así maximizar la producción de los valiosos contenidos celulares, a través de modelos cinéticos, métodos integrados de cosecha y transformación de biomasa, que contribuyan a la disminución de costos y mejoramiento de la rentabilidad (Figuroa-Torres et al., 2021; A. Ortiz et al., 2021; Sivaramakrishnan et al., 2021), es

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

por esto que su uso a escala industrial propone soluciones a la demanda creciente de combustibles y la contaminación del recurso hídrico, contribuyendo a mitigar los impactos ambientales generados por el calentamiento global (Arun et al., 2020).

Considerando la novedad de los sistemas de aprovechamiento de aguas residuales mediante microalgas y cianobacterias, aun se hace necesario evaluar la sostenibilidad de estos procesos, que permita confirmar si todo el sistema propuesto puede ser considerado como una alternativa ambientalmente viable, donde se refleje una mitigación de los impactos ambientales generados. Para dicho fin se propone la implementación del análisis de ciclo de vida (ACV), ya que permiten determinar las alteraciones procedentes de cada una de las transformaciones que recibe la materia prima hasta convertirse en el producto final (Muralikrishna et al., 2017). Los ACV son considerados una herramienta dinámica que varía en función de las condiciones actuales del área de investigación, no obstante, el análisis generalmente abarca 4 etapas; la primera corresponde a la delimitación del alcance y objetivo del análisis; la segunda es la etapa de inventario, la cual recopila la descripción de todos los flujos de materia y energía que entran y salen del sistema de producción, así como su posible interacción con el medio ambiente; la tercera es la etapa de evaluación de impactos ambientales y la cuarta es la interpretación y reporte de resultados del ciclo de vida (Normalització et al., 2006). De esta forma es posible estimar los efectos positivos y adversos derivados del cultivo y refinamiento de biomasa de microalgas, ya que, aunque tienden a ser tecnologías verdes que propician la economía circular, en general se reporta la elevada demanda energética y de agua en el sistema, aun cuando se hace uso de aguas residuales para mitigar el requerimiento nutricional (A. Kumar, 2021; Y. Liu et al., 2021; Thielemann et al., 2021).

La aplicación del ACV a los sistemas de aprovechamiento de aguas residuales mediante microalgas y cianobacterias, propone un área de investigación relevante que aporta información

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

valiosa a la hora de tomar decisiones y formular escenarios adecuados para hacer usufructo de las microalgas. En literatura, los ACV relacionados a esta tecnología, aunque nueva, es relativamente amplia y con tendencia creciente donde analizan los impactos potenciales de; la ubicación geoespacial de biorrefinerías (Bussa et al., 2020), la combinación de métodos para la extracción de metabolitos (J. Ferreira et al., 2020), producción de bioestimulantes y alimentos acuícolas (Herrera et al., 2021), recuperación de bioenergía a partir de aguas residuales producidas por procesamiento hidrotermal de biomasa (Leng et al., 2020), generación de biocombustible en condición de autoabastecimiento energético con efecto de fijación de carbono (Peiyao Li et al., 2020), briquetas de biomasa de microalgas cultivadas en aguas residuales (Marangon et al., 2021), estrategias para la mitigación de impactos (Rebello et al., 2021; Tua et al., 2021), sin embargo, los resultados del estudio pueden variar dependiendo de la ubicación geoespacial y de aspectos económicos tanto nacionales como internacionales, es por eso que el ACV aplicado a un sistema de aprovechamiento de aguas residuales domesticas en el municipio de Cúcuta, Norte de Santander, es pertinente y de gran importancia ambiental para la región.

La situación ambiental de años recientes evidencia el recrudecimiento del cambio climático y el calentamiento global de acuerdo a los escenarios estudiados por el Panel Intergubernamental de cambio climático (IPCC), donde se reporta que los incendios e inundaciones aumentan en relación directa con el aumento de la temperatura y que el estrés hídrico se ve influenciado en gran medida por de las dinámicas poblacionales, metodologías industriales y actividades económicas, exacerbándose por el cambio climático y disminuyendo la disponibilidad del agua (IPCC, 2018), por tanto es imperante contribuir con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para mitigar los impactos ambientales derivados de las actividades antrópicas, especialmente aquellos que afectan el recurso hídrico, puesto que este es vital para sustentar cualquier forma de vida.

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

Los vertimientos de aguas residuales son un indicador del déficit de la gestión racional del agua, ya que contribuyen directamente al estrés hídrico y los ecosistemas afectados experimentan cambios fisicoquímicos como la disminución del oxígeno disuelto, aumento de materia orgánica, muerte o migración de especies, bioacumulación, biomagnificación y se pueden convertir en incubadores de vectores y enfermedades hídricas (Akpor, 2011).

En el departamento de Norte de Santander, de acuerdo con el diagnóstico reportado en el plan de desarrollo departamental, se presentan bajos porcentajes de cobertura de alcantarillado especialmente en las zonas rurales, lo cual se traduce en el déficit de tratamiento de aguas residuales, con porcentaje de tratamiento de aguas servidas del 5%, un valor muy por debajo del promedio nacional. A fecha del año 2022, de los 40 municipios del departamento, solo 13 cuentan con sistemas de tratamiento de las aguas residuales generadas en el casco urbano y algunos de ellos no están en funcionamiento o no se les realiza el mantenimiento apropiado. En cuanto a la ciudad capital, Cúcuta, es la única capital del país con más de 500 mil habitantes que no cuenta con el servicio de tratamiento de aguas residuales, al igual que algunos de los municipios aledaños que también conforman el área metropolitana (Gobernación de Norte de Santander, 2020), generándose un vertimiento significativo en el cauce de los ríos Pamplonita y río Zulia. Por lo tanto, la investigación científica que aporte conocimiento para el tratamiento de estos caudales regionales es necesaria, y de esta forma promover la mitigación de los impactos ambientales, así mismo, los sistemas que a su vez aprovechen la carga contaminante de los vertimientos para el cultivo de microalgas, propone una perspectiva novedosa para el departamento, puesto que la biomasa de estos microorganismos ha generado interés en varios sectores industriales, debido a sus contenidos celulares.

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

De acuerdo con la información recolectada de la base de datos Scopus, los estudios realizados en Colombia relacionados a los ACV de sistemas de aprovechamiento y tratamiento de aguas residuales con microalgas, son escasos, ya que para las últimas dos décadas solo se reportan 7 documentos.

En este sentido, el presente trabajo de maestría aplicó la metodología del análisis de ciclo de vida a dos sistemas piloto de tratamiento de agua residual, As y UASB, cuyos efluentes tratados fueron empleados en la producción de biomasa microalgal con el fin de comparar sus potenciales impactos ambientales, evaluando la sostenibilidad del sistema.

Las actividades desarrolladas se alinean con las necesidades y programas descritos en el plan de desarrollo municipal 2020-2023 de Cúcuta “Cúcuta 2050, estrategia de todos”, ya que este trabajo contribuye con lo propuesto en la Línea estratégica 5, la cual en su Componente 6, busca: “Garantizar el acceso, la prestación y el goce de los servicios públicos en óptimas condiciones para lograr un uso eficiente, optimizando recursos y mejorando continuamente los procesos, gestión, resultados y legalidad” (Gabinete Municipal, 2020, p.333). También, en el plan de desarrollo para Norte de Santander 2020-2023 “Más oportunidades para todos”, en su eje estratégico 4. Hábitat, establece en el programa 5.3.2. “Acceso a agua potable y saneamiento adecuado”, subprograma “Apoyo a la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales” busca el desarrollar sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales apoyados en su diseño y/o construcción.

De igual manera, los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) comprometidos en el desarrollo del trabajo de investigación corresponden a:

Objetivo 6: “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, ya que sus metas buscan mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación y vertimientos, aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores, asegurar el

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua.

Objetivo 9: “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación” ya que este propende por apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, utilizar los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías limpias y ambientalmente racionales, fomentar la innovación y gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.

Objetivo 11: “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles”, pues en sus metas se busca reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades e incrementar el número de ciudades que adoptan planes integrados para el uso eficiente de los recursos.

Objetivo 15: “Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad” ya que este objetivo busca conservar, restablecer y hacer uso sostenible de los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan.

### **Estado del Arte**

De acuerdo con la búsqueda realizada en la base de datos Scopus, se obtuvieron 615 documentos en el periodo de tiempo comprendido desde el 2000 al 2023, con palabras clave relacionados al ACV, tratamiento de aguas residuales y microalgas. La ecuación de búsqueda general fue TITLE-ABS-KEY ( ( lca ) AND ( biomass OR algae OR microalgae OR biorefinery OR "secondary products" OR pigments OR wastewater OR "domestic wastewater"

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

AND treatment ) ), a la cual se le realizaron algunas restricciones como eliminar contenido no relevante.

### **1.1. Producción bibliográfica y su comportamiento en el tiempo**

En la **Figura 1**, se observa una tendencia creciente de la cantidad de documentos publicados por año, cuyo pico más alto obtenido para el 2020 cuenta con 86 publicaciones relacionadas a la búsqueda. El documento con más citaciones corresponde al ACV y análisis técnico-económico (o techno-economic assessment -TEA) para la valorización de la tecnología de licuefacción hidrotermal, pues esta posee potencial en la extracción de aceite biocrudo a partir de biomasa húmeda, con potencial para la extracción de nutrientes y otros recursos energéticos que podrían valorizarse (Watson et al., 2020), la temática general de los artículos de interés gira en torno a la valorización y análisis de otras tecnologías para la producción de biomasa, tratamiento de aguas residuales y los lodos producidos en estos sistemas (Baaqel et al., 2020; Diaz-Elsayed et al., 2020; Lee et al., 2020; Medina-Martos et al., 2020; Pesqueira et al., 2020). Los documentos publicados en la primera década de los 2000 se interesan en establecer mediciones para los impactos generados en la ecosfera debido a los cambios tecnológicos inducidos por el concepto de desarrollo sostenible, donde el ACV se propone como una herramienta para evaluar y comparar sistemas de tratamiento de agua potable y residual (Beavis et al., 2003; Clauson-Kaas et al., 2001; Halleux et al., 2006; Houillon et al., 2005; Narodoslowsky et al., 2000; Pillay et al., 2002; Rebitzer et al., 2003; Tangsubkul et al., 2005), también se reportan investigaciones relacionadas específicamente a los nutrientes encontradas en la orina y la remoción sustentable del nitrógeno en aguas residuales (Maurer et al., 2003; Mulder, 2003), optimización de pretratamiento y tratamiento para captura de metales y otros microcontaminantes (Erol et al., 2006; Wenzel et al.,

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

2008), procesos avanzados de oxidación (Muñoz et al., 2005), estimación de consumos energéticos e impactos derivados de aplicar tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales como, lodos activados y filtración de baja velocidad, en comunidades descentralizadas, pequeñas y rurales (Machado et al., 2007; M. Ortiz et al., 2007) y en general los inconvenientes de la implementación tecnológica para la recuperación, reciclaje y reutilización de agua (Salgot, 2008), los cuales van en aumento debido a que el ACV varían dependiendo de la región en la cual se aplican y las condiciones económicas que le afecten.

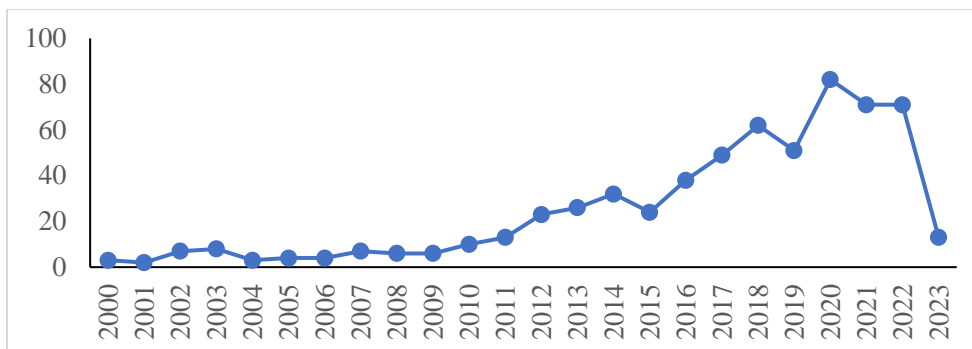
Para el año 2021 el curso de los documentos reportados está enfocados en sistemas de tratamiento para efluentes residuales industriales (Ahangarnokolaei et al., 2021; Betancur-Ramírez et al., 2021; Foglia et al., 2021; Giri et al., 2021; Harris et al., 2021; Santiago et al., 2021; Teow et al., 2021) o comparación de tecnologías basadas en su viabilidad tecno económica y ambiental (A. C. D. Ferreira et al., 2021; Filote et al., 2021; W. Liu et al., 2021; Loh et al., 2021; Nowrouzi et al., 2021; Saidulu et al., 2021; Savla et al., 2021; Tetteh et al., 2021; J. Yang et al., 2021), biorrefinerías o sistemas para la obtención de bioproductos a partir de residuos (Calicioglu et al., 2021; Sarkar et al., 2021; Satayavibul et al., 2021), como la implementación de microalgas en aguas residuales para la obtención de metabolitos de interés industrial y simultanea remoción de carga contaminante (de Souza et al., 2021; Fazal et al., 2021; A. Kumar, 2021; Tua et al., 2021).

Para el 2022 las publicaciones se centran en análisis de sistemas con enfoque en economía circular para el aprovechamiento de residuos orgánicos (Ashokkumar et al., 2022; Cen et al., 2022; Gahane et al., 2022; Yrjälä et al., 2022), así como del análisis para sistemas de tratamiento de agua residual (Al-Anbari et al., 2022; Glover et al., 2022; Y. Hu et al., 2022).

**Figura 1.**

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

*Cantidad de documentos publicados con relación a ACV, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2022.*



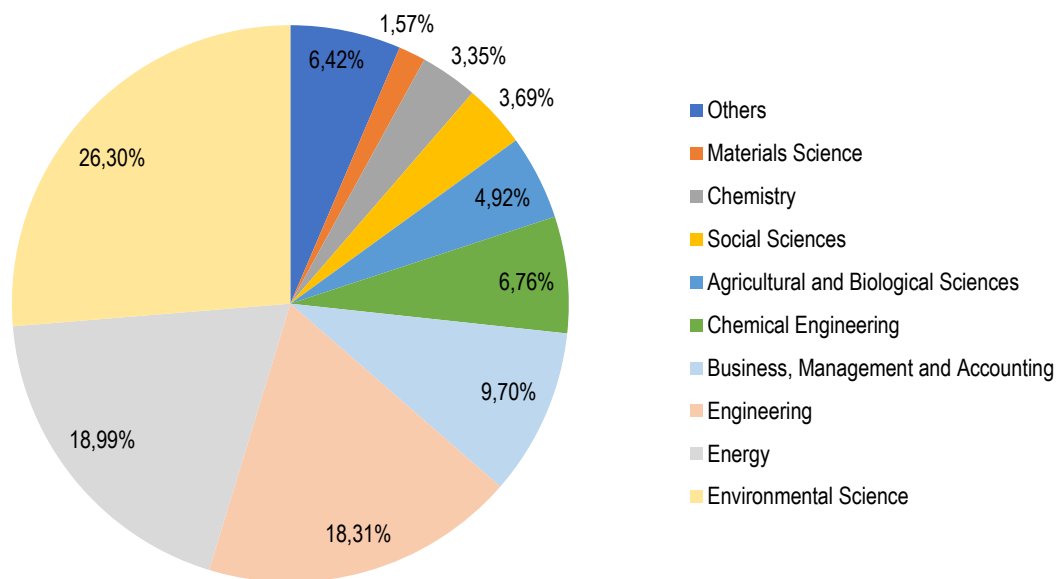
*Nota.* La grafica muestra la producción de artículos relacionados a LCA. Información adaptada de Scopus.

Las áreas de conocimiento involucradas están representadas en la **Figura 2**, de las cuales la temática que posee mayor porcentaje de registro es la ciencia medioambiental con un 26.3% del total evaluado, seguida por Energía con 18.99% e ingeniería con 18.31%, esto corresponde con la esencia misma de los ACV. La categoría “otros” involucra áreas como Ciencias de la Computación, Matemáticas, Economía, Inmunología y microbiología, Multidisciplinario, Artes y Humanidades, Profesiones de la salud.

### **Figura 2.**

*Áreas temáticas con relación a ACV, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2022.*

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS



*Nota.* La grafica muestra la distribución de las publicaciones realizadas desde el 2000 hasta el 2022 de acuerdo con el área de investigación. Información tomada de Scopus, modificada por los autores.

### 1.2. Producción bibliográfica de acuerdo con territorio o país

El país que lidera la información publicada es España seguido de China y Estados Unidos, mientras que Colombia se ubica en el puesto 32 con solo 7 publicaciones relacionados en las últimas dos décadas (**Figura 3**).

España ha incursionado en el campo energético con artículos sobre biocombustibles a partir de desechos orgánicos (Angulo-Mosquera et al., 2021; Guerrero et al., 2018) y biomasa (Iribarren et al., 2012) la cual también fue evaluada para la producción de hidrogeno (Iribarren et al., 2014), y en análisis de sistemas de tratamiento de aguas residuales relacionados a varias industrias como la textil (Buscio et al., 2019), minera (Martínez et al., 2019), de lácteos (Stanchev et al., 2020) y farmacéutica (Rodríguez et al., 2016; Sbardella et al., 2020), así mismo, se registra gran variedad

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

de literatura en cuanto al tratamiento de aguas residuales municipales para poblaciones descentralizadas (Arias, Rama, et al., 2020; M Garfí et al., 2017; Garrido-Baserba et al., 2014; Lemos et al., 2013; Meneses et al., 2015; Morera et al., 2016, 2020; Pretel et al., 2016) y manejo de residuos orgánicos como los lodos, implementado la carbonización hidrotermal (Medina-Martos et al., 2020; Owsianiak et al., 2016).

La literatura producida por China es bastante variada, desde la valorización de tecnologías y análisis para la extracción de biocombustibles a partir de biomasa de microalgas (Huang et al., 2020), residuos sólidos municipales (Ripa et al., 2017; Watson et al., 2020), recuperación de nutrientes de otros residuos (M. Ahmed et al., 2019) hasta el estudio de tratamiento de aguas residuales urbanas (S. Bai et al., 2017; Y. Li et al., 2013; Long et al., 2018; Lu et al., 2017; Song et al., 2019; Zang et al., 2015), producción de hidrogeno (J. Chen, Xu, Wu, et al., 2019; J. Chen, Xu, Zuo, et al., 2019), y el manejo y aprovechamiento de lodos (Buonocore et al., 2018; H. Li et al., 2017; Lishan et al., 2018; Wei et al., 2018).

El aporte de Estados Unidos al estado del arte se relaciona a la investigación y análisis de tecnologías para la producción de energía a base de biocarbón (Lee et al., 2020; Miller-Robbie et al., 2015; Puettmann et al., 2020; Z. Wang et al., 2014) y biocombustibles (Pereira et al., 2019; Roostaei et al., 2017; Y. Yang et al., 2020), igualmente aporta información de relevancia en cuanto a sistemas de tratamiento del suelo (Hou et al., 2016), biorreactores de membrana (Krzeminski et al., 2017), manejo del agua enfocado al reúso y tratamiento de efluentes residuales (Bartholomew et al., 2016; Caballero et al., 2020; L Corominas et al., 2013; Cram et al., 2018; Dimuro et al., 2014; García-Montoya et al., 2016; Gude, 2016; Jeong et al., 2018; Theregowda et al., 2015; Xue et al., 2016) así como de la generación de gases de efecto invernadero en plantas de tratamiento

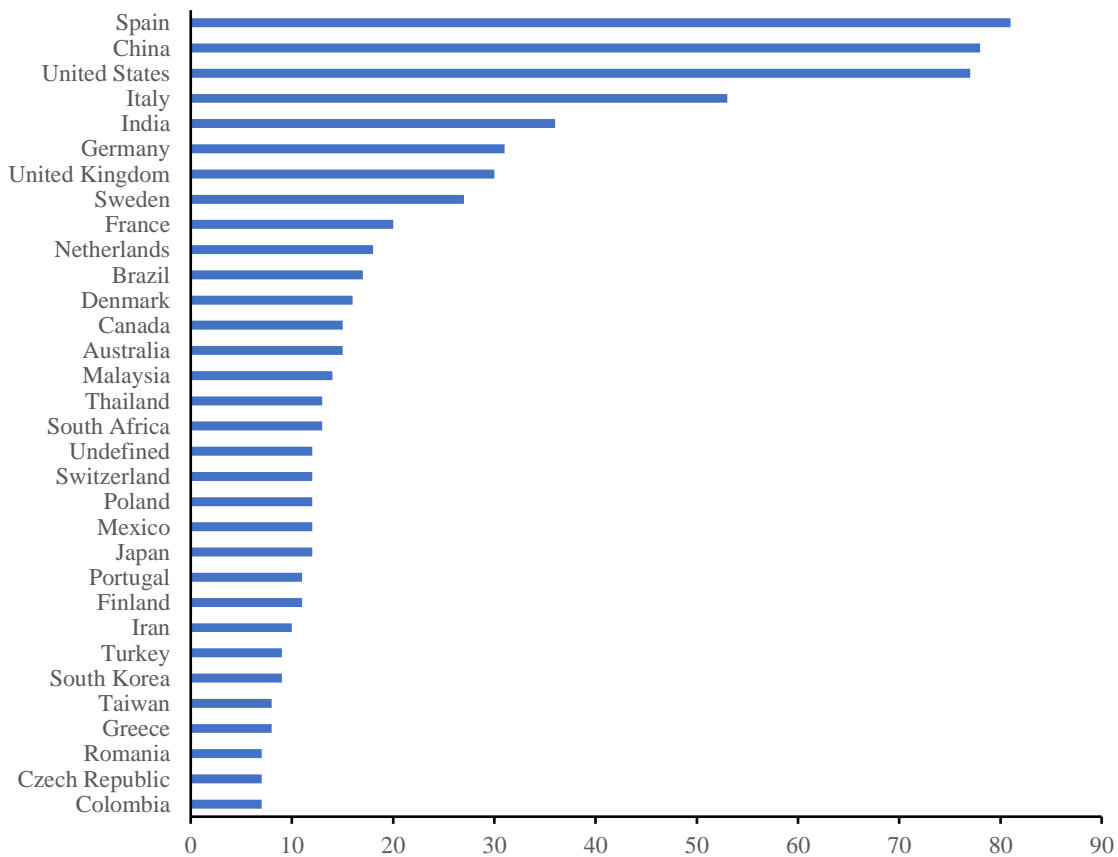
## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

(Rodríguez-García et al., 2012) y mejora del tratamiento de lodos producidos (Alyaseri et al., 2017).

Colombia, registra información relacionada a sistemas de tratamiento de aguas residuales (Meneses-Jácome et al., 2016; Padrón Páez et al., 2017) e implementación y análisis del proceso de fotofenton (Belalcázar-Saldarriaga et al., 2018; Grisales et al., 2019), así como mejoras ambientales derivadas del tratamiento anaeróbico enfocado en la obtención de energía (Meneses-Jácome et al., 2020; Tatiana et al., 2016).

### Figura 3.

*Documentos publicados por territorio o país con relación a ACV, tratamiento de aguas residuales y microalgas, entre los años 2000 y 2022.*



## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS**

*Nota.* La grafica muestra las publicaciones por país realizadas desde el 2000 hasta el 2022. Información fu adaptada de Scopus.

### **1.3. Producción bibliográfica para el tratamiento de aguas residuales municipales**

El análisis de ciclo de vida de varios tratamientos de aguas residuales domesticas municipales reporta que la tecnología de lodos activados puede ser modificada para mejorar la remoción de diferentes tipos de contaminantes, y el aspecto de mayor carga para los impactos ambientales fue el consumo de energía eléctrica. La tecnología de lodo activado de reactor de bucle vertical es el esquema más rentable y con menos impactos ambientales (Prateep Na Talang et al., 2020).

La implementación de tecnologías sanitarias reduce el daño a la salud humana en más del 50% cuando se aplican tratamientos biológicos secundarios como lodos activados, y una reducción adicional del 20% cuando se implementan tratamientos terciarios, como la ozonización o carbón activado (Papa et al., 2016).

Existe un precedente de ACV en el tratamiento de agua residual para beneficio de ganado, en Cúcuta (Colombia), donde se estableció que el sistema de tratamiento biológico aerobio mediante lodos activados es medioambientalmente beneficioso ya que promueve la degradación natural de la materia orgánica y también la producción de lodos que pueden ser empleados en otros procesos (Tatiana et al., 2016).

Los impactos ambientales de tratamientos con lodos activados en la fase de operación son más altos que en la de construcción, debido al aumento del consumo de energía eléctrica necesaria para oxigenación y los requerimientos de remoción de fosforo, por otro lado, los humedales artificiales generan mayores impactos ambientales en la etapa de construcción y son relativamente

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

menos contaminantes durante la operación, sin embargo, el tipo de filtración puede modificar significativamente este resultado (Lopsik, 2013b). También se demostró que biorreactores de membrana presentan mejor rendimiento ambiental en comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales domesticas municipales (Banti et al., 2020).

El tratamiento de grandes volúmenes de lodos activados también ha sido estudiado, ya que es un sub producto de los sistemas de tratamiento y en general cuenta con altas concentraciones de microorganismos y materia orgánica, por esto se analizó el escenario donde se hace la conversión del lodo en carbón activado granular para su posterior reutilización en el control de la contaminación del agua, lo cual demuestra tener beneficios económicos para los procesos de tratamiento (Pesqueira et al., 2020).

Para comunidades pequeñas, los sistemas de tratamiento de humedales artificiales son medioambientalmente más sostenibles que los lodos activados, no obstante, este último debería ser usado para centros poblados más grandes (Yildirim et al., 2012). Otro estudio soporta esta afirmación ya que reporta impactos ambientales entre 2 a 5 veces más altos para lodos activados en comparación con “tecnologías basadas en la naturaleza” como los humedales artificiales y los sistemas de estanques de algas de alta tasa (M Garfí et al., 2017). También se reporta que los sistemas de humedales artificiales son la mejor opción como sistemas pequeños in-situ para el tratamiento de agua residual y los impactos de los sistemas de lodos activados pueden reducirse al implementar tecnología fotovoltaica.(de Feo et al., 2017; Machado et al., 2007).

Para comunidades descentralizadas se menciona que los biorreactores anaeróbicos de membrana son la tecnología más aconsejable, puesto que estos sistemas permiten la recuperación de energía como biogás y el consumo de electricidad es nulo, la calidad del efluente por otro lado depende de las regulaciones nacionales, es por esto que al seleccionar el tipo de tratamiento deben

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS**

considerarse aspectos como la normatividad ambiental vigente, percepción social de los beneficios y factores de localización (Arias, Feijoo, et al., 2020a). Se estudió que el tratamiento anaerobio termofílico de lodos activados representa menos impactos ambientales (Lanko et al., 2020) y también la recuperación de materia orgánica de tratamientos primarios e implementación del proceso parcial de nitrificación-anammox en reactores anaerobios como tratamiento secundario es medioambientalmente favorable (Arias, Feijoo, et al., 2020b) ya que las alternativas anaerobias generan 38% menos de lodos y requiere 50% menos oxígeno (Bagley, 2000; Pretel et al., 2016).

### **1.4. Producción bibliográfica de microalgas cultivadas en aguas residuales**

La investigación de las implicaciones ambientales de los sistemas de cultivo de microalgas aún está en desarrollo y la evaluación de escenarios para comparar los mejores sistemas, empleando residuos como fuente nutricional, propone un área de exploración necesaria para soportar la definición de economía circular. Así pues, se puede encontrar que, en comparación con tecnologías convencionales, los impactos ambientales de los sistemas de cultivo de microalgas se pueden reducir en un 30% al emplear aguas residuales como fuente nutricional y 56% al usar CO<sub>2</sub> proveniente de la combustión de gasolina como fuente carbono (Magalhães et al., 2021b). La implementación de efluentes residuales de la producción de aceite de oliva (almazara) en cultivos de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus quadricauda* ha probado ser medioambientalmente beneficioso ya que se valoriza el efluente evitando el impacto del tratamiento, sin embargo, la distancia de transporte de las aguas residuales influye en la optimización del sistema (de Benedetti et al., 2015). La integración del manejo de efluentes residuales con cultivos de *Chlorella vulgaris* en estanques de conductos abiertos, puede ayudar a superar las desventajas reportadas en el cultivo de esta microalga, también el uso de la biomasa puede aumentar su competitividad económica en

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

plantas de biogás al aprovechar lodo de aguas residuales y heces de bovinos y porcinos como materia prima para la digestión anaerobia (Bussa et al., 2020). El estudio de la simbiosis entre microalgas y bacterias aún está en etapas tempranas, pero se considera que los tratamientos secundarios y terciarios pueden ser reemplazados por estos consorcios. Por otro lado, los ACV sobre la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal reportan que este enfoque no es sustentable debido a los altos costos de nutrientes y energía, sin embargo, la perspectiva de cultivar en efluentes residuales representa una solución a ese problema, además, estos microorganismos pueden remover una gran cantidad de contaminantes y su biomasa se puede emplear para la generación de biogás, compostaje, suplemento alimentario y producción de biocompuestos (A. Kumar, 2021)

De igual manera otros estudios muestran que se han empleado aguas pretratadas enriquecidas con nutrientes para cultivos de algas en lagunas de alta tasa, lo cual demostró satisfacer la demanda de productividad de lípidos derivados de microalgas mejorando el impacto ambiental del proceso de producción de biocombustible (Peiyao Li et al., 2020). El proceso de producción de biodiesel a partir de biomasa de *Chlorella vulgaris* cultivada en lagunas abiertas usando aguas residuales domesticas requiere menos energía y es una opción sustentable para reemplazar cultivos en agua fresca, sin embargo, se requiere un pretratamiento para eliminar partículas sólidas en el caudal residual que alimenta el sistema. La fase de extracción posee los impactos ambientales más altos debido a los requerimientos químicos (ciclo-hexano) y energéticos, y el rendimiento en la producción de biodiesel también es dependiente de la cepa cultivada (Raghuvanshi et al., 2018). Datos experimentales a escala piloto de cultivos de bajo costo de microalgas en aguas residuales municipales usando lagunas para la producción de biometano como reemplazo al combustible vehicular, ofrece beneficios para la protección del clima, recursos

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

fósiles y agotamiento de la capa de ozono, sin embargo, los impactos en otras categorías son negativos, debido a la demanda en el uso de tierra y las tecnologías empleadas en la producción del biogás. El concepto de biorrefinería de algas puede reducir en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación al tratamiento convencional de agua residual (Maga, 2017).

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar que en general el software más utilizado para realizar ACV es SimaPro junto con la metodología de impacto ReCiPe. También *Chlorella vulgaris* es la cepa más usada para cultivos en aguas residuales, y la unidad funcional en general está relacionada al volumen de agua tratada o biomasa producida.

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

**Tabla 1.**

*Información de los ACV desarrollados en torno a tratamiento de aguas residuales y microalgas*

Objetivo	Unidad funcional	Escenarios	Software	Metodología de impacto	Referencia	Año	Citado	Cepa
Uso de aguas residuales de almazara para el cultivo de microalgas	1 m <sup>3</sup> de medio de cultivo	Cultivo de microalgas en BG-11 Cultivo de microalgas con medio basado en aguas residuales de almazara	SimaPro	método de evaluación desarrollado específicamente para este trabajo	(Benedetti et al., 2015)	2015	2	<i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Scenedesmus quadricauda</i>
Biometano producido a partir de microalgas cultivadas en aguas residuales municipales	1 m <sup>3</sup> de aguas residuales tratadas (fu 1)  1 MJ GNC (LHV) utilizado en un motor de gas (fu 2)	Tratamiento de aguas residuales aplicando el enfoque All-Gas en comparación con el tratamiento de aguas residuales Biometano de microalgas en comparación con el gas natural comprimido (GNC) utilizado como combustible de automoción.	GaBi	ReCiPe versión 1.08	(Maga, 2017)	2017	24	Policultivo de microalgas
Viabilidad de producción de biodiesel a partir de microalgas utilizando aguas residuales y agua dulce.	1 MJ de energía producida a partir de biodiésel de agua dulce y aguas residuales	Agua Fresca Agua residual domestica	Umberto NXT Universal	El método ReCiPe se utiliza tanto para evaluaciones de punto medio y final	(Raghuvanshi et al., 2018)	2018	5	<i>Chlorella vulgaris</i>
Potencial de procesos anaerobios con cuatro sustratos diferentes (biorresiduos municipales, lodos de planta de tratamiento, estiércol bovino y porcino), para la producción de biogás, acoplados con cultivos de microalgas.	1 kg de biomasa de microalgas desintegradas en seco	Sistema 1 Cogeneración de biometano con depuración de biogás cubriendo la demanda energética Sistema 2 Cogeneración de biometano con purificación de biogás que cubre la demanda de dióxido de carbono Sistema 3 Cogeneración de biometano sin purificación	SimaPro 9.0.0.29	ReCiPe 2016 Endpoint v1.02	(Bussa et al., 2020)	2020	12	<i>Chlorella vulgaris</i>
Impactos asociados con la producción de biomasa en efluentes domésticos	1 kg de biomasa producida en cada sistema	Todos los escenarios fueron evaluados en estanques de alta tasa (HRP) C1. Cultivo base con pretratamiento USAB	SimaPro © 9.0.0	ReCiPe método de punto medio, para 13 categorías de impacto.	(Magalhães et al., 2021b)	2021	1	Mezcla de bacterias y microalgas, <i>Chlorella</i>

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

	como unidad funcional	<p>C2. Efluente predesinfectado por UV Reactor y con pretratamiento USAB</p> <p>C3. HPR con suplementación de CO2 industrial (99,9% de pureza) con pretratamiento de tanque séptico</p> <p>C4. HPR con suplemento de CO2 (gases de escape de la combustión de gasolina - EGGC) con pretratamiento de tanque séptico</p> <p>C5. Sistema híbrido, HRP + BR (crecimiento adjunto en reactor de biopelícula) - HPR con suplementación de CO2 industrial (99,9% de pureza) con pretratamiento Manta de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB)</p> <p>C6. Sistema híbrido HRP + BR (crecimiento adjunto en reactor de biopelícula) con pretratamiento UASB</p> <p>C7. HPR con suplemento de CO2 industrial (99,9% de pureza) con pretratamiento UASB</p>							<i>vulgaris</i> fue la especie predominante
<b>Opciones de tratamiento de aguas residuales para comunidades pequeñas y descentralizadas</b>	1 p.e. (equivalente de población) y período de comparación se fijó en 10 años	<p>humedal artificial</p> <p>Proceso de infiltración de velocidad lenta</p> <p>Lodos activados</p>	SimaPro 7	clasificación, caracterización (El centro de ciencias ambientales - CML 2 Baseline 2000) y normalización	(Machado et al., 2007)	2007	87		N/A
<b>Alternativas de tratamiento de aguas residuales para comunidades de pequeña escala</b>	1 p.e. Se considera la fase de operación de los sistemas en un período de 20 años.	<p>Tratamiento de tierras con vegetación (VLT)</p> <p>Humedal construido (CW)</p> <p>Sistemas de tratamiento de lodos activados (AST)</p>	SimaPro 7.1	CML 2000 baseline	(Yildirim et al., 2012)	2012	41		N/A
<b>Tratar las aguas residuales de un municipio pequeño, diseñado para menos de 2000 p.e.</b>	Tratamiento de 1 p.e. aguas residuales municipales, considerando un período de operación de 15 años del sistema de tratamiento	<p>Filtro híbrido de humedal construido (CW)</p> <p>Sistema de tratamiento de lodos activados por aireación extendida (ASTS)</p>	SimaPro Faculty 7.2	Impact ReCiPe 2002 y	(Lopsik, 2013a)	2013	44		N/A
<b>Evaluación ambiental de una Sistema de tratamiento</b>	1 kg / s de aguas	Planta de beneficio ganadero ubicada en Cúcuta (Colombia)	SIMAPRO 7.0	Método EDP 2013	(Tatiana et al., 2016)	2016	3		N/A

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

<b>biológico de aguas residual en planta de beneficio ganadero</b>	residuales tratadas	Planta de beneficio ganadero ubicada en Bucaramanga (Colombia)							
<b>Evaluar la sostenibilidad económica y ambiental de una posible PTAR urbana basada en AnMBR combinando modelos de desempeño de estado estacionario (utilizando el software de simulación DESASS)</b>	volumen de aguas residuales tratadas (m <sup>3</sup> )	lodos activados convencionales biorreactores de membrana aeróbica biorreactor sumergido de membrana anaeróbica	SimaPro 8.03	CML 2 baseline 2000	(Pretel et al., 2016)	2016	54	N/A	
<b>Impactos ambientales asociados a tecnologías naturales y convencionales para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas aglomeraciones</b>	1 m <sup>3</sup> de agua	Lodos activados Humedales artificiales Sistemas de estanques de algas de alta tasa	SimaPro 8	ReCiPe, método del punto medio	(M Garfí et al., 2017)	2017	117	N/A	
<b>Evaluar, en la fase de diseño, el comportamiento medioambiental de dos sistemas de tratamiento a pequeña escala in situ diferentes</b>	Tratamiento de aguas residuales producidas por 15 p.e. en un horizonte temporal variable de 10, 15 y 20 años	Lodo activado Sistema de humedales construidos	SimaPro 7	Método 2008 H	ReCiPe (de Feo et al., 2017)	2017	25	N/A	
<b>Comparar los sistemas de lodos activados y biorreactor de membrana</b>	1L de agua procesada o tratada	Proceso convencional de lodos activados Proceso de biorreactor de membrana	SimaPro	Medido en tres parámetros, salud humana, calidad del ecosistema y uso de recursos y tierra.	(Singh et al., 2019)	2019	1	N/A	
<b>Evaluar desde una perspectiva ambiental y económica la incorporación de la estrategia de tratamiento de aguas residuales a través de materia orgánica recuperada seguida de una nitrificación parcial-Anammox</b>	1 kWh de energía producida 1 m <sup>3</sup> de aguas residuales tratadas	Combinación de UASB y Lodos activados de película fija integrada (IFAS) Secuencia de Lodos activados de alta tasa (HRAS) seguida de IFAS Filtro de banda giratorio (RBF) y tratamiento primario químico mejorado (CEPT) acoplados a la unidad IFAS Clarificador primario (PC) y luego un tratamiento biológico a base de lodos activados (AS)	SimaPro 9.0	ReCiPE (H) v1.1 puntomedio	(Arias, Feijoo, et al., 2020b)	2020	4	N/A	
<b>Comparar el impacto ambiental de una unidad de biorreactor de membrana y una unidad de lodo activado convencional que trata</b>	1 m <sup>3</sup> de efluente (aguas residuales tratadas).	Biorreactor de membrana (MBR) Proceso de lodos activados convencional	openLCA	CML 2001	(Banti et al., 2020)	2020	4	N/A	

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

<b>aguas residuales municipales de carga similar</b>								
<b>Estimar los impactos ambientales generales de la planta de tratamiento de efluentes textiles</b>	efluente 1 (ES-1) con 1.500 m <sup>3</sup> / día efluente 2 (ES-2) con 1.200 m <sup>3</sup> / día	Unidad de tratamiento de aguas residuales (0% de reutilización de agua) 50% de reutilización de agua	GaBi 8.7	CML 2001	(Nakhate et al., 2020)	2020	9	N/A
<b>Investigar el impacto ambiental de la digestión anaeróbica (DA) de lodos dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados</b>	1 m <sup>3</sup> de aguas residuales tratadas 1 m <sup>3</sup> de metano producido	Comparar los impactos ambientales potenciales de tres tipos de digestión anaerobia: (i) mesófilos; (ii) termófilo; (iii) digestión anaeróbica escalonada por temperatura Toda la planta de tratamiento Solo la línea de lodos (SL)	SimaPro 8.	ReCiPe V1.12. Método del punto medio	(Lanko et al., 2020)	2020	3	N/A

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Objetivos

### 1.5. Objetivo general

Evaluar los sistemas piloto de lodos activados (AS) y reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) para el aprovechamiento de los efluentes tratados de aguas residuales domesticas de Cúcuta (Norte de Santander) en cultivos de *Chlorella* sp., mediante la metodología del análisis de ciclo de vida.

### 1.6. Objetivos específicos

- Analizar los flujos de materia y energía involucrados en los escenarios de operación de las plantas piloto de AS y UASB, y sus respectivos acoples con microalgas, de acuerdo con los lineamientos requeridos por la metodología del ACV.
- Evaluar los impactos ambientales potenciales de los cuatro escenarios asociados a la implementación de AS y UASB en el aprovechamiento de aguas residuales domésticas en los cultivos de microalgas, de acuerdo con la metodología del ACV y empleando el software SimaPro.
- Determinar el sistema potencialmente sostenible de acuerdo con la interpretación de los ciclos de vida de cada escenario.

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Metodología

Se realizó la aplicación del ACV durante la operación de los sistemas piloto de tratamiento (AS y UASB) y aprovechamiento del agua residual, siguiendo los lineamientos de la ISO 14044:2006, la cual abarca cuatro aspectos importantes:

- Definición de la meta y el alcance
- Análisis de inventario
- Evaluación de impactos
- Interpretación de resultados

Aunque al inicio del estudio las primeras tres etapas pueden ser lineales, estas son dependientes entre sí, el ajuste de una podría implicar el reajuste de otra, es por eso por lo que el proceso de interpretación se extiende a lo largo de todas (**Figura 4**).

**Figura 4.**

*Fases del ACV*



*Nota.* Adaptado de la ISO 14044:2006

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## 1.7. Alcance

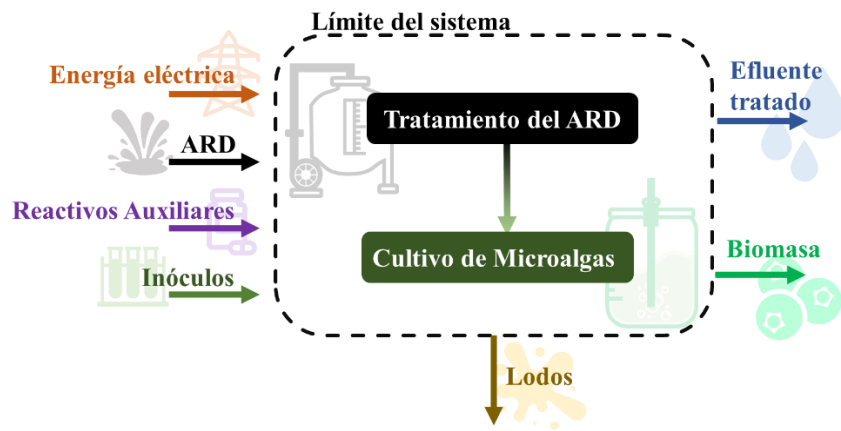
### 1.7.1. Delimitación del sistema

El ACV evaluó la operación de los sistemas piloto de AS y UASB ubicados en la sede campos elíseos de la Universidad Francisco de Paula Santander, en el laboratorio de operaciones unitarias, en el municipio de los Patios en Norte de Santander. Las aguas residuales domésticas empleadas en el proceso de tratamiento corresponden a las vertidas en la vereda El Pórtico perteneciente al corregimiento de San Pedro.

La delimitación de los sistemas se presenta de forma general en la **Figura 5**, considerándose todos los escenarios de cuna a puerta, ya que abarca el ingreso de las aguas residuales a los sistemas pilotos, entregando como producto principal el efluente tratado y en algunos escenarios, debido al posterior aprovechamiento de los efluentes tratados en los cultivos de microalgas, se genera como subproducto la biomasa de *Chlorella* sp. Se realizó el análisis individual para el tratamiento base con AS y UASB, así como el de sus respectivos acoples para el aprovechamiento del efluente tratado en cultivos.

### Figura 5.

Diagrama de flujo del sistema de aprovechamiento de aguas residuales domésticas



## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

*Nota.* Los escenarios no acoplados a los cultivos corresponden solamente al análisis del tratamiento de agua residual o escenario base.

**1.7.1.1. Unidad Funcional.** La función principal del sistema es tratar el agua residual domestica buscando aprovechar los efluentes tratados por los sistemas de AS y UASB en el crecimiento de los microorganismos fotosintéticos. Por lo tanto, la unidad funcional corresponde a un metro cubico ( $1\text{m}^3$ ) de agua tratada que cumpla con los parámetros fisicoquímicos regulados por la resolución 0631 del 2015. La cantidad de biomasa se estimó como un subproducto.

El sistema no consideró los aspectos del transporte del agua residual, así como tampoco el enfoque de biorrefinería para la biomasa obtenida, puesto que dicho subproducto no se analizó para la obtención de metabolitos.

**1.7.1.2. Asignación de cargas.** La asignación de cargas se realizó por atributos físicos, aplicando los porcentajes correspondientes a la cuantificación de masa del agua tratada y biomasa producida durante la operación de los sistemas piloto.

Generación del inventario. El conglomerado de información para el análisis consta de datos primarios, que fueron recolectados por el equipo de monitoreo y caracterización de los procesos experimentales desarrollados en la Universidad Francisco de Paula Santander en sus laboratorios de Operaciones unitarias, Aguas e INNOValgae. Los datos secundarios fueron proveídos por la base de datos Scopus y las incluidas en el software SimaPro 9.1.1., Ecoinvent y Agri-footprint.

Los datos experimentales fueron procesados de acuerdo con las protocolos y ensayos empleados por el laboratorio aguas de la UFPS, los cuales se desarrollan con base en las metodologías descritas en el Standard Methods, 2017. Los datos secundarios están avalados por la

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLÉ DE CULTIVO DE MICROALGAS**

metodología empleada por el programa SimaPro, el cual certifica la transparencia y concordancia con las especificaciones requeridas por la Organización Internacional de Estandarización (ISO).

**1.7.1.3. Limitaciones.** El sistema se ve limitado por las características del equipamiento y dimensiones prediseñadas de las plantas piloto, fabricados por Generatoris S.A. de C.V., adquiridos previamente por la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), así mismo, los cultivos a escala de 30L para *Chlorella* sp., se realizaron en reactores prediseñados y adquiridos previamente por el laboratorio INNOValgae.

**1.7.1.4. Escenarios.** Para el estudio comparativo de ACV se establecieron los siguientes escenarios:

- Escenario 1: Sistema de Lodos activados (AS) para el tratamiento de aguas residuales.
- Escenario 2: Sistema de AS acoplado con aprovechamiento de efluentes tratados en cultivos de microalgas (AS+M).
- Escenario 3: Sistema de reactor anaerobio de flujo ascendente para el tratamiento de aguas residuales (UASB)
- Escenario 4: Sistema de UASB acoplado con aprovechamiento de efluentes tratados en cultivos de microalgas (UASB+M).

Previamente al análisis de cada sistema se generaron los procesos correspondientes para:

- Simular el vertimiento de agua residual, el cual se modeló teniendo en cuenta las bases de datos del software, la caracterización fisicoquímica experimental y los datos reportados por (Güereca et al., 2011)

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

- Determinar los impactos ambientales en la producción de inóculos de biomasa microalgal de acuerdo con las metodologías desarrolladas por el laboratorio Innovalgae de la UFPS y correlación de procesos industriales de acuerdo con las bases de datos publicadas por la Washington State University en su programa de energía, de la cual se obtuvo la información para los procesos de desinfección.
- Establecer los impactos propios para activación de lodo aerobio y anaerobio.
- Delimitar los requerimientos energéticos para cultivar microalgas en los estanques de alta tasa de acuerdo con lo expuesto por (Magalhães et al., 2021a) ya que es una tecnología ampliamente usada para este propósito usando fotoperiodos naturales.

### **1.8. Fase 1: Análisis de los flujos de materia y energía**

El inventario del ciclo de vida (ICV) se realizó mediante control y registro de los flujos de masa y energía empleados en la operación de los sistemas piloto de AS y UASB, partiendo desde la activación de los inóculos, pruebas hidráulicas, mantenimiento de reactores y pruebas de remoción para obtener el efluente tratado final con producción de biomasa. Los equipos piloto fabricados por GENERATORIS S.A.S., corresponden a los modelos TA-PB-080 / PE para el tratamiento con AS y TA - BG - 021/DES para UASB. La operación de los equipos piloto para el tratamiento de aguas residuales y cultivos de microalgas estuvo a cargo del personal contratado por parte de la UFPS.

Los requerimientos energéticos fueron suplidos por la red eléctrica municipal de Norte de Santander, la cual hace parte del 68% de la energía hidráulica aportada a la matriz energética colombiana (ACOLGEN, 2020), sin embargo, para propósitos de la simulación en el software, se empleó la matriz eléctrica colombiana proveída por las bases de datos.

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

### ***1.8.1. Caracterización del agua residual***

La caracterización del agua residual se realizó teniendo en cuenta los parámetros límite regulados por resolución 0631 del 2015, la cual establece valores máximos para realizar vertimientos de agua doméstica en cuerpos de aguas superficiales. También se realizaron mediciones de Fosfatos ( $PO_4$ ) y Nitratos ( $N-NO_3^-$ ) con el propósito de medir las características nutricionales del agua residual tratada en los cultivos de microalgas. Los ensayos fueron realizados por el laboratorio de aguas de la UFPS.

### **1.9. Fase 2: Evaluación de los impactos del ciclo de Vida (EICV)**

Los impactos ambientales generados durante los procesos de aprovechamiento fueron evaluados con el software SimaPro 9.1.1 ya que posee un algoritmo eficiente que proporciona la evaluación de impactos ambientales de una gran cantidad de procesos unitarios y recopila, analiza y monitorea el desempeño ambiental del proceso productivo, aportando información estadística requerida para los análisis de sensibilidad de datos.

Según la norma ISO 14040, la fase de evaluación de impactos consta de los siguientes puntos obligatorios:

#### ***1.9.1. Definición de categorías de impacto.***

La metodología de evaluación de impactos empleada es ReCiPe de punto medio con perspectivas culturales “Hierarchist”, puesto que, permite transformar los listados de la fase de caracterización e inventario en cantidades precisas de indicadores, los mecanismos de impacto empleados generalmente tienen alcance global y asume que los impactos futuros han sido incluidos en el análisis del inventario (pre-sustainability, n.d.). También, en literatura se identifican como la

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

más relevante para analizar el tratamiento de efluentes y el cultivo de microalgas en aguas residuales (Arashiro et al., 2018; Magalhães et al., 2021b).

Los dieciocho indicadores correspondientes a la metodología seleccionada se muestran a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

### *Categorías de impacto*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Abreviación</b>	<b>Unidades de caracterización</b>
Calentamiento global	CG	kg CO <sub>2</sub> eq.
Agotamiento del ozono estratosférico	AOE	kg CFC11 eq.
Radiación ionizante	RI	kBq Co-60 eq
Formación de ozono, salud humana	FO-SH	kg NO <sub>x</sub> eq.
Formación de material particulado	FMP	kg PM <sub>2.5</sub> eq.
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	FO-ET	kg NO <sub>x</sub> eq.
Acidificación terrestre	AT	kg SO <sub>2</sub> eq.
Eutrofización de agua dulce	EAD	kg P eq.
Eutrofización marina	EM	kg N eq.
Ecotoxicidad terrestre	EcT	kg 1,4-DBC eq.
Ecotoxicidad en agua dulce	EcAD	kg 1,4-DBC eq.
Ecotoxicidad marina	EcM	kg 1,4-DBC eq.
Toxicidad cancerígena humana	TCH	kg 1,4-DBC eq.
Toxicidad humana no cancerígena	TNCH	kg 1,4-DBC eq.
Uso del suelo	US	m <sup>2</sup> cultivo anual eq
Escasez de recursos minerales	ERM	kg Cu eq
Escasez de recursos fósiles	ERF	kg crudo-eq
Consumo de agua	CA	m <sup>3</sup> Consumido

*Nota.* CFC11: clorofluorocarbono 11. DBC: Diclorobenceno

### **1.9.2. Clasificación.**

Se realizó la asignación del ICV de acuerdo con lo planteado en la delimitación del sistema para cada escenario y la asignación de cargas establecida por la cuantificación de caudal tratado y biomasa producida.

# **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

## ***1.9.3. Caracterización***

Los resultados obtenidos para cada escenario fueron analizados para determinar el sistema con menor impacto negativo durante la operación, y se plantean soluciones para mitigar algunos de los impactos generados por los flujos involucrados en la generación de impactos ambientales potenciales.

## **1.10. Fase 3: Determinación del sistema potencialmente sostenible**

Los hallazgos realizados en las dos fases precedentes se combinaron para establecer las conclusiones y recomendaciones del estudio. Las etapas de esta actividad fueron las siguientes las siguientes:

- Identificación de aspectos significativos basados en los resultados del inventario, de la evaluación de impactos o de ambas.
- Evaluación, que incluye pruebas de la integridad del estudio, la sensibilidad y la consistencia.
- Conclusiones, recomendaciones y comunicación de los aspectos relevantes.

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Resultados y discusión

### 1.11. Fase 1: Análisis de los flujos de materia y energía

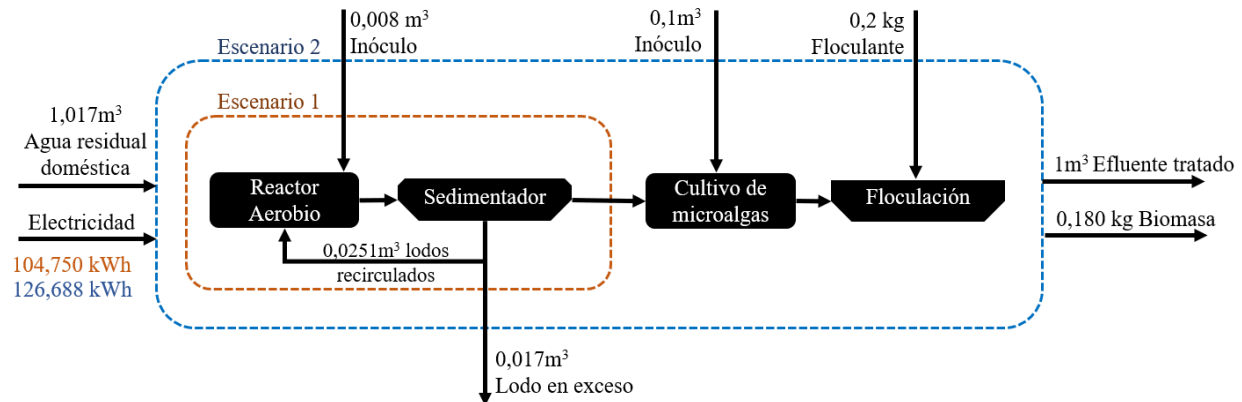
El detalle de los datasets empleados en cada sistema se encuentran en el Apéndice A-

#### 1.11.1. Diagramas de flujo

La cuantificación de los flujos para el ICV se realizó de acuerdo con las delimitaciones establecidas para cada escenario, estas se presentan en la Figura 6 para los escenarios con tratamiento aerobio (AS y AS+M) del ARD y en la Figura 7 para los escenarios con tratamiento anaerobio (UASB y UASB+M).

#### Figura 6.

Diagrama de flujo para escenarios 1 y 2

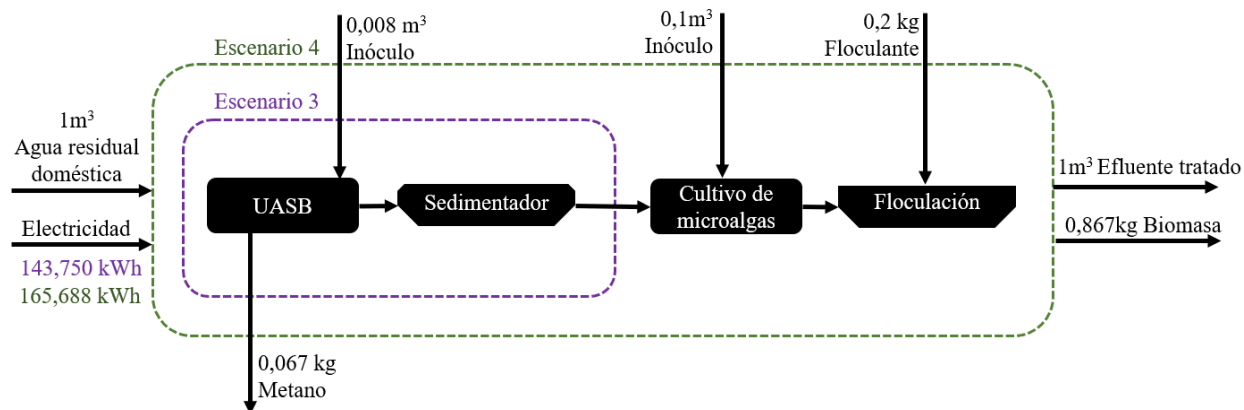


*Nota.* Delimitación de los escenarios 1 (AS) y 2 (AS+M). El flujo de electricidad del escenario 1 se muestra en color naranja, mientras que la del escenario 2 se muestra en azul.

#### Figura 7.

Diagrama de flujo para escenarios 3 y 4

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS



*Nota.* Delimitación de los escenarios 3 (UASB) y 4 (UASB+M). El flujo de electricidad del escenario 3 se muestra en color morado, mientras que la del escenario 4 se muestra en verde.

### 1.11.2. Caracterización del agua residual

La caracterización del agua residual vertida por la comunidad al río Pamplonita, así como de los efluentes de cada escenario y la normativa ambiental colombiana vigente se muestra en la Tabla 3. Se puede observar que de los dos escenarios base (1 y 3) solo el escenario 1 cumple por sí solo con la normatividad vigente para vertimiento. El escenario 4 mejora la calidad del efluente de UASB al remover el 88,9% de la DQO, haciendo que cumpla con el valor establecido para este parámetro en la resolución 0631.

Lo anterior se describe para caudales calculados in situ de 0.28 L/s para horas de la mañana y 0.25 L/s para horas de la tarde.

**Tabla 3.**

*Parámetros fisicoquímicos de los afluentes y efluentes.*

Parámetros	Agua Residual	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Resolución 0631
DQO (kg/m <sup>3</sup> )	0.3878	0.02133	0.002	0.1779	0.043	0.18
DBO5 (kg/m <sup>3</sup> )	0.197	0.01386	-	0.16745	-	0.09
GYA (kg/m <sup>3</sup> )	0.035	0.017	-	0.024	-	0.02
NO3 (kg/m <sup>3</sup> )	0.1549	0.0272	0.001	0.0993	0.005	NA
PO4 (kg/m <sup>3</sup> )	0.0009	0.00064	0.001	0.00015	0	NA

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

SST (kg/m <sup>3</sup> )	0.1008	0.0224	-	0.024	-	0.09
--------------------------	--------	--------	---	-------	---	------

Nota. Adaptado del proyecto interadministrativo 3098 del 2021

En las Tabla 4 y Tabla 5 se presentan los inventarios de entradas y salidas de cada uno de los sistemas piloto de acuerdo con la unidad de referencia escogida para el estudio, la cual corresponde a un metro cubico (1 m<sup>3</sup>) de agua residual tratada. A cada sistema se le realizaron una serie de pruebas preliminares de retención hidráulica, cinéticas y mantenimiento de reactores hasta determinar los parámetros de operación definitivos.

En la Tabla 4 se especifican los procesos desarrollados en la operación del sistema de AS, de los cuales, el mantenimiento #3 fue empleado para el tratamiento del agua residual y cuantificación de eficiencias de remoción del sistema. El proceso denominado “postratamiento con microalgas” corresponde al acople con los cultivos de *Chlorella* sp o escenario 2, éste consume un 20.1% más electricidad que el escenario base (escenario1).

Los sistemas de tratamiento aerobio poseen producción de lodo en exceso, el cual fue modelado para disposición en relleno sanitario, puesto que no se les realizó ningún tratamiento.

### Tabla 4.

*Balance de masa y energía del sistema de Lodos activados (AS).*

	Proceso	Inóculo de lodo ingresado (m3)	Energía eléctrica consumida (kWh)	Inoculo de biomasa ingresado (m3)	Sulfato de aluminio (kg)	Lodos en exceso generados (kg)	Biomasa generada kg
Lodos Activados	Activación del lodo	0.353	84.706	--	--	--	--
	Retención hidráulica	0.008	100	--	--	NR	--
	mantenimiento #1	0.008	88	--	--	NR	--
	Cinética #1	0.008	44	--	--	NR	--
	mantenimiento #2	0.008	44	--	--	NR	--
	Cinética #2 o	0.008	104.75	--	--	5.208	--
	mantenimiento #3	0.008	126.688	0.1	0.2	5.208	0.180
	post tratamiento Microalgas						

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

*Nota.* NR (no registrado). Los procesos de mantenimiento corresponden a la alimentación de las comunidades biológicas del reactor con agua residual, las cinéticas fueron procesos para la cuantificación de los parámetros cinéticos que regían la remoción de la carga contaminante.

La Tabla 5 muestra los procesos realizados durante la operación del sistema piloto de UASB, de los cuales el mantenimiento #2 corresponde al proceso realizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas y cuantificación de eficiencias, así mismo, el “postratamiento con microalgas” corresponde al acople con los cultivos de *Chlorella* sp, o escenario 4, el cual aumenta el consumo eléctrico en un 15% comparado con el escenario 3.

El sistema anaerobio cuenta con la producción de biogás, el cual fue modelado como emisión al aire, puesto que no se le realizó ningún proceso adicional.

**Tabla 5.**

*Balance de masa y energía del sistema de reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)*

	Proceso	Inoculo de lodo ingresado (m3)	Energía eléctrica consumida (kWh)	Inoculo de biomasa ingresado (m3)	Sulfato de aluminio (kg)	Biogás (kg)	Biomasa generada (kg)
UASB	Activación del lodo	--	0	--	--	NR	--
	Mantenimiento Retencion#1	0.011	107.8125	--	--	NR	--
	Mantenimiento #2	0.008	138.958	--	--	NR	--
	post tratamiento Microalgas	0.008	143.75	--	--	0.0672	--
	post tratamiento Microalgas	0.0024	165.688	0.1	0.2	0.0672	0.867

*Nota.* NR (no registrado). Los procesos de mantenimiento corresponden a la alimentación de las comunidades biológicas del reactor con agua residual, las cinéticas fueron procesos para la cuantificación de los parámetros cinéticos que regían la remoción de la carga contaminante.

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS

El registro de los flujos de entrada y salida definitivos, de acuerdo con la unidad funcional (1m<sup>3</sup> de ARD), empleados en el proceso de modelado se presentan en la Tabla 6, donde se registran los valores experimentales y bibliográficos para cada escenario evaluado. De acuerdo con los datos recolectados se aprecia que el consumo eléctrico fue mayor en los escenarios base con tratamiento anaerobio (143.75 a 165.688 kWh/m<sup>3</sup>), debido a que la potencia de las bombas peristálticas del UASB piloto eran más altas que las empleadas por el equipo de AS.

**Tabla 6.**

*Resumen de inventario*

Parámetro	1. AS		2. AS+M		3. UASB		4. UASB+M	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
DQO (kg)	0.3878	0.02133	0.3878	0.002	0.3878	0.1779	0.3878	0.043
DBO <sub>5</sub> (kg)	0.197	0.01386	0.197	0.01386	0.197	0.16745	0.197	0.16745
GYA (kg)	0.035	0.017	0.035	0.017	0.035	0.024	0.035	0.024
NO <sub>3</sub> (kg)	0.1549	0.0272	0.1549	0.000	0.1549	0.0993	0.1549	0.005
PO <sub>4</sub> (kg)	9E-04	6E-04	9E-04	0	9E-04	2E-04	9E-04	0
Dureza total (kg)	0.16	0.13	0.16	0.13	0.16	0.16	0.16	0.16
Cloruros (kg)	1.5E-02	6.0E-02	1E-02	6E-02	1E-02	3E-02	1E-02	3E-02
Sólidos suspendidos totales (kg)	1.0E-01	2.2E-02	1E-01	2E-02	1E-01	2E-02	1E-01	2E-02
Sólidos Suspendidos Volátiles (kg)	2.3E-01	4.5E-02	2E-01	5E-02	2E-01	5E-02	2E-01	5E-02
Hierro (kg)	4.3E-04	7.0E-05	4E-04	7E-05	4E-04	7E-05	4E-04	7E-05
Manganeso (kg)	2.0E-05	1.0E-05	2E-05	1E-05	2E-05	1E-05	2E-05	1E-05
Plomo (kg)	8.0E-05	8.0E-05	8E-05	8E-05	8E-05	8E-05	8E-05	8E-05
Cadmio (kg)	8.0E-05	8.0E-05	8E-05	8E-05	8E-05	8E-05	8E-05	8E-05
Mercurio (kg)	4.0E-07	4.0E-07	4E-07	4E-07	4E-07	4E-07	4E-07	4E-07

**Caracterización del agua residual/emisiones al agua**

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

	Arsénico (kg)	1.0E-06	1.0E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	Cromo (kg)	5.0E-05	5.0E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05
	Zinc (kg)	1.8E-04	5.0E-05	2E-04	5E-05	2E-04	5E-05	2E-04	5E-05
	Cobre (kg)	4.0E-05	4.0E-05	4E-05	4E-05	4E-05	4E-05	4E-05	4E-05
<b>Entradas al sistema</b>	Energía eléctrica (kWh)	104.75		126.688		143.75		165.688	
	Inoculo de lodo (m3)	0.008		0.008		0.008		0.008	
	Inoculo de microalgas (m3)	-		0.1		-		0.1	
	Cloruro de Aluminio (kg)	-		0.2		-		0.2	
<b>Salidas del sistema</b>	Biomasa de microalgas (kg)	-		0.180		-		0.867	
	Lodo para disposición (kg)	5.208		5.208		-		-	
	Metano (kg)	-		-		0.0672		0.0672	

Nota. Resumen de inventario. Los valores de la caracterización de metales pesados corresponden a los reportados por Güereca et al., (2011)

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

### 1.12. Fase 2: Evaluación de los impactos del ciclo de Vida (EICV)

Cada escenario fue analizado de acuerdo con las categorías de impacto definidas por la metodología ReCiPe midpoint, así mismo, se presentan alternativas para mitigar los impactos ambientales generados. El análisis de las categorías de impacto mayormente afectadas se desarrolló de acuerdo con la normalización, la cual emplea factores de normalización por persona, enmarcados en la perspectiva hierarquizada del método ReCiPe.

#### *1.12.1. Escenario 1 (AS) y 2 (AS+M)*

De acuerdo con los resultados descritos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el escenario 1 reportó los más altos porcentajes de remoción de la carga contaminante, 94.5% de la DQO, 93% de la DBO<sub>5</sub>, 82.4% de NO<sub>3</sub>, excepto para la concentración de PO<sub>4</sub>, la cual fue del 28.9%,

En la Figura 8 se presentan los potenciales de impacto normalizados para el escenario 1 y 2, donde se valora que el potencial de impactos calculados para el escenario 1, en la mayoría de las categorías, fue más bajo que el escenario 2. Las categorías de potencial de toxicidad cancerígena humana (0.7055 kg equivalentes de 1,4 DCB-eq), ecotoxicidad de agua dulce (0.7884 kg 1.4 DBC-eq), ecotoxicidad marina (1.002 kg 1.4 DBC-eq) y eutrofización de agua dulce (0.0060 kg P-eq) son las cuatro más afectadas por el escenario 1 y corresponden respectivamente al 45%, 20%, 15% y 6% de la normalización.

En el escenario 2, el acople con los cultivos de microalgas mejora la remoción de NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub> hasta casi un 100%, no obstante, el potencial de los impactos fue mayor en casi todas las categorías y la distribución de las cuatro más afectadas de acuerdo con la normalización corresponde al 47%, 20%, 15% y 5% respectivamente para toxicidad cancerígena humana (1,440

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

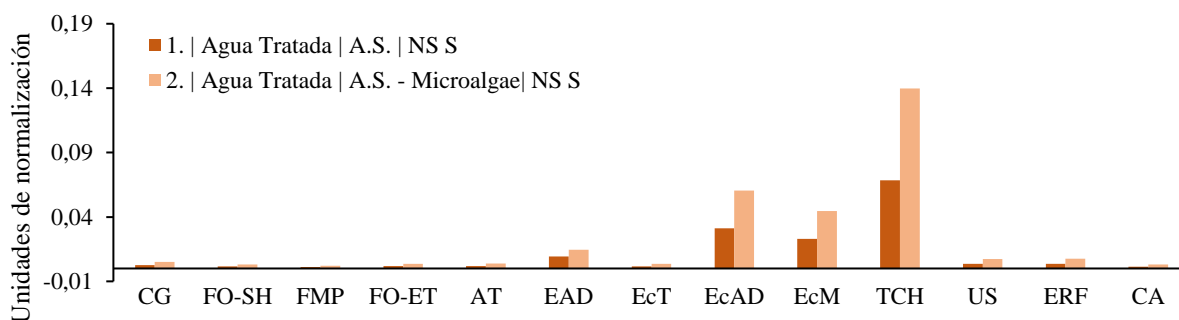
kg DCB-eq), ecotoxicidad de agua dulce (1,525 kg DCB-eq), ecotoxicidad marina (1,934 kg DCB-eq) y eutrofización de agua dulce ( $9,458 \times 10^{-3}$  kg P-eq), es decir, en el orden dado, existe un aumento del 104.13%, 93.39%, 92.91% y 57.43% en comparación con las categorías del escenario 1.

El aumento más significativo fue del 138.83% y se presentó en el potencial de escasez de recursos minerales, ya que aumentó de  $2.2549 \times 10^{-2}$  a  $5.3853 \times 10^{-2}$  kg de Cu eq, a razón de los requerimientos nutricionales en los inóculos de biomasa. En contraste y como excepción al aumento de los impactos ambientales, la categoría del potencial de eutrofización marina posee una disminución del 60.39%, variando desde  $2.2567 \times 10^{-3}$  a los  $8.9387 \times 10^{-4}$  kg N eq, debido a la remoción de  $\text{NO}_3$  realizada por las microalgas.

En general, el acople con los cultivos de microalgas no representa mayores beneficios medioambientales, puesto que el sistema acoplado aumenta casi al doble (1.97 veces) el impacto general del sistema base de AS como consecuencia del aumento en la demanda eléctrica para satisfacer las necesidades de las microalgas.

### Figura 8.

*Normalización de impactos Ambientales potenciales de los escenarios 1 y 2*



Otros autores como Marianna Garfí et al., (2017) reportan que los impactos ambientales más significativos generados por la operación del sistema de lodos activados son escasez de

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

recursos fósiles (16 kg de crudo eq), calentamiento global (1.1 kg CO<sub>2</sub> eq) y acidificación terrestre (7.5x10<sup>-3</sup> kg SO<sub>4</sub> eq), por otro lado, Nowrouzi et al., (2021) reporta que la mayor carga ambiental está dada por las emisiones atmosféricas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, lo cual se traduce en un mayor puntaje para la categoría de calentamiento global. Lopsik, (2013), reporta mayores impactos en las categorías de eutrofización del agua dulce, eutrofización y ecotoxicidad marinas, y recomienda optimización de consumo eléctrico en la etapa de operación y acople con tecnologías que mejoren la remoción de fósforo.

Las divergencias anteriormente descritas en las categorías de impacto pueden deberse a las matrices eléctricas empleadas en la simulación, ya que como se mencionó, el consumo eléctrico genera los mayores aportes a los impactos ambientales durante la etapa de operación, la cual posee un mayor potencial de impactos en los sistemas tradicionales en comparación con sistemas más naturales como los humedales construidos y los estanques de microalgas de alta tasa, donde el consumo eléctrico es bajo o casi nulo (Marianna Garfí et al., 2017; Lopsik, 2013b).

El consumo eléctrico en relación con la cantidad de agua tratada es otro factor importante, puesto que el potencial de impactos es mayor en plantas de tratamiento pequeñas, es decir, cuando el sistema de tratamiento purifica menor cantidad de agua residual, (Dixon et al., 2003; Güereca et al., 2011; Lorenzo-Toja et al., 2015; Machado et al., 2007; Yıldırım et al., 2012), lo cual se confirma en esta investigación, ya que los pilotos consumieron más energía eléctrica por metro cúbico que lo reportado por Corominas et al., (2020) y Longo et al., (2016).

Como alternativa para mitigar los impactos, el lodo en exceso podría ser aprovechado para la producción de fertilizantes mediante un tratamiento previo, lo cual no solo ha demostrado mejorar las tasas de crecimiento de las plantas (Kravtsova et al., 2021). La Figura 10 muestra el potencial de impacto de los escenarios cuando, desde una perspectiva de economía circular, el lodo

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

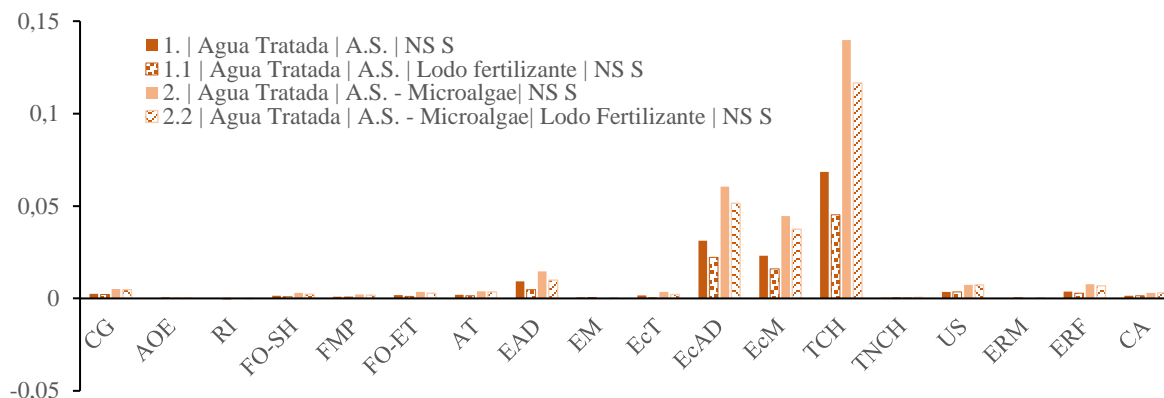
en exceso no se dispone en un relleno sanitario sino que es empleado para producir fertilizantes, lo cual reduce casi al 32% los impactos ambientales generados por el escenario 1 y al 16.5% los impactos del escenario 2, sin embargo, la cuantificación de la composición fisicoquímica del lodo y la metodología de su tratamiento antes de aplicarlo al suelo, deben ser consideradas dentro del análisis del ciclo de vida. En cuanto a la reducción del impacto en las cuatro categorías más afectadas por el escenario 1, se caracterizaron valores de los 0,4654 kg 1,4-DBC eq para el potencial de toxicidad cancerígena humana, 0,5610 kg 1,4-DBC eq en el de ecotoxicidad de agua dulce, 0,6940 kg 1,4-DBC eq de ecotoxicidad marina y 0.0030 kg P eq para eutrofización de agua dulce, lo cual representa reducciones del 34.06%, 28.87%, 30.80% y 49.69% respectivamente. La reducción más importante se presenta en la categoría de radiación ionizante, con un valor de impacto positivo del 0.1047 kBq Co-60 eq, lo cual implica una reducción del 303.02%.

Por otro lado, la variación de los potenciales caracterizados en las categorías de impacto más afectadas en el escenario 2 al plantear el reúso del lodo en exceso fueron de 1,2006 kg 1,4-DBC eq en toxicidad cancerígena humana, 1,2977 kg 1,4-DBC eq de ecotoxicidad de agua dulce, 1,6260 kg 1,4-DBC eq para ecotoxicidad marina y  $6.4811 \times 10^{-3}$  kg P eq para la eutrofización del agua dulce, es decir, reducciones del 16.65%, 14.90%, 15.93% y 31.50% respectivamente. De forma similar al escenario 1, la categoría con la mayor reducción del impacto en el escenario 2, fue la radiación ionizante ( $3.6209 \times 10^{-2}$  kBq Co-60 eq) con una reducción del 130.42%.

### **Figura 9.**

*Normalización de escenarios con reúso de lodo en exceso como fertilizante*

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS



*Nota.* Comparación de los escenarios al considerar el reúso del lodo en exceso como fertilizante.

### 1.12.2. Escenario 3 (UASB) y 4 (UASB+M)

El escenario 3 se presenta como contraste a las remociones obtenidas en el escenario 1, ya que no solo el consumo eléctrico fue mayor, sino que también logró una eficaz remoción del  $PO_4$  alcanzando un porcentaje del 83%, pero en otros parámetros como la DQO,  $DBO_5$  y  $NO_3$  los porcentajes de remoción fueron del 54%, 15% y 36% respectivamente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Los escenarios anaerobios presentaron un aumento del consumo eléctrico debido a la potencia de las bombas peristálticas de funcionamiento constante en la alimentación del reactor.

El acople con cultivos de microalgas (escenario 4) se presenta como una forma efectiva para mejorar el efluente del tratamiento anaerobio, puesto que aumenta los porcentajes de remoción hasta el 88.9% para la DQO, 96.8% para los  $NO_3$  y casi el 100% para los  $PO_4$ .

La Figura 10 muestra las categorías de impacto más afectadas por el escenario 3 y 4, que fueron las mismas obtenidas para los escenarios 1 y 2, toxicidad cancerígena humana, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina y eutrofización del agua dulce, cuyos porcentajes en la normalización para el escenario 3 son del 43% (0,8362 kg DBC eq), 19% (0,8954 kg DBC eq), 14% (1,1300 kg DBC eq) y 10% ( $1.2614 \times 10^{-2}$  kg P eq) y para el escenario 4 del 45% (1,5228 kg

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

DBC eq), 19% (1,5827 kg DBC eq), 14% (1.9996 kg DBC eq) y 8% ( $1.6162 \times 10^{-2}$  kg P eq) respectivamente.

De acuerdo con la normalización, el aumento en el potencial de las categorías de impacto al aplicar el acople con cultivos de microalgas fue del 82.12%, 76.76%, 76.96% y 28.12% respectivamente para toxicidad cancerígena humana, ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad marina y eutrofización del agua dulce. El mayor aumento calculado fue de 102.21% y corresponde a la categoría de escasez de recursos minerales, la cual aumentó desde  $2.8959 \times 10^{-2}$  a  $5.8557 \times 10^{-2}$  kg Cu eq.

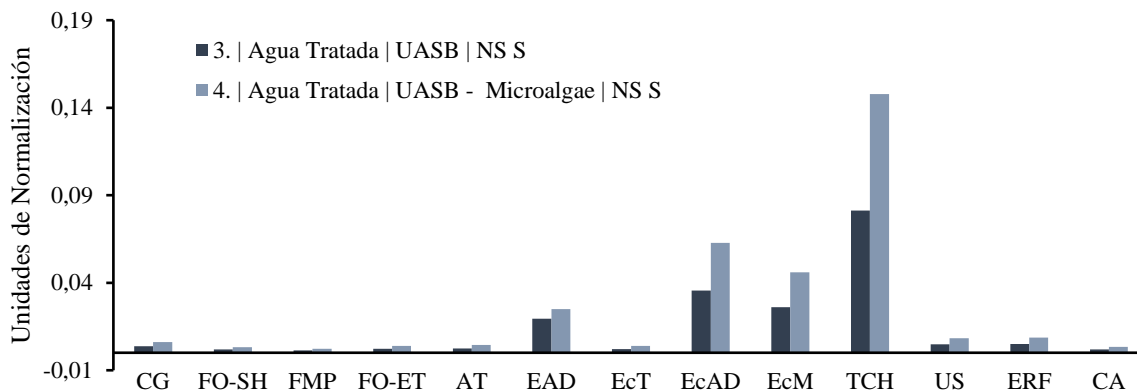
La similitud en las categorías de impacto mayormente afectadas se debe a que el consumo eléctrico es el principal potenciador de impactos ambientales en todos los escenarios y éste a su vez está directamente relacionado a las fuentes de energía de la matriz energética empleada, la cual no cambia en ningún escenario.

El escenario 4 mejora la calidad del efluente tratado del sistema anaerobio base (escenario 3), lo cual se ve representado en la disminución del 84.72 %, del potencial de la categoría de impacto eutrofización marina, la cual baja desde  $7.0865 \times 10^{-3}$  a  $1.0831 \times 10^{-3}$  kg N eq, no obstante, el impacto ambiental general del escenario 4 es 1.7 veces mayor que el escenario base anaerobio (escenario 3), nuevamente debido al consumo eléctrico.

### **Figura 10.**

*Normalización de impactos ambientales de los escenarios 3 y 4.*

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS



A pesar de que los impactos son mayores en los escenarios de tratamiento anaerobio, estos sistemas ofrecen alternativas que podrían mejorar su rendimiento general, pues el reúso del lodo anaerobio digerido como base para fertilizantes agrícolas puede ser beneficioso a la estructura del suelo ya que posee altas concentraciones de materia orgánica, lo cual reduciría impactos en el sistema. La quema del biogás producido afecta ampliamente los potenciales de impacto de toxicidad en la salud humana y potenciales de eutrofización (Cañote et al., 2021; Stanchev et al., 2020), y la emisión directa agrava los puntajes en las categorías de cambio climático y formación de oxidantes fotoquímicos (Boldrin et al., 2022), es por esto por lo que se pueden mitigar los impactos si el metano producido se emplea para satisfacer una parte de los requerimientos energéticos del mismo sistema que los produce. De acuerdo con Foglia et al., (2021) la configuración de sistemas anaeróbicos beneficia la mayoría de las categorías de impacto, excepto la eutrofización del agua dulce, esto debido a las bajas remociones de nitrógeno y fósforo, como solución a lo anterior, se pueden acoplar otro tipo de tecnologías (Satayavibul et al., 2021), esto nuevamente queda registrado en los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, ya que las microalgas mejoraron la remoción de  $\text{PO}_4$  y  $\text{NO}_3$ .

El rendimiento teórico para la producción de metano es de  $0.35\text{m}^3$  por kg de DQO degradada (Tauber et al., 2019; C. Zhang et al., 2017), sin embargo, los rendimientos reales son

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS

menores, dependiendo de variables intrínsecas del tipo de agua residual y de la tecnología empleada para hacer aprovechamiento del biogás (Bourque et al., 2008; Santos et al., 2016; Tilche et al., 2008). De acuerdo con Suhartini et al., (2019), asumiendo una conversión eléctrica del 35% se puede estimar que  $1\text{m}^3$  de metano produce  $10\text{kWh}$ , con lo cual se puede calcular que el aprovechamiento del metano reduce el consumo energético en un 0.3% para el escenario 3 y 0.1% para el escenario 4.

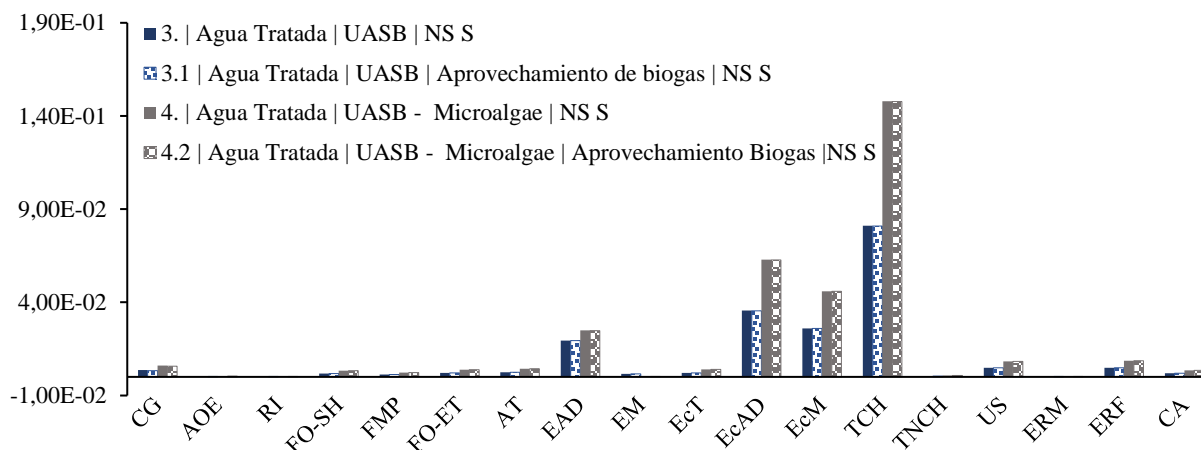
La Figura 11 permite observar la variación de los escenarios de tratamiento anaerobio al emplear la energía provista por el metano. En las categorías de impacto normalizadas más afectadas para el escenario 3 se aprecian disminuciones del 0.291% (toxicidad cancerígena humana), 0.237 % (ecotoxicidad del agua dulce), 0.243% (ecotoxicidad marina) y 0.118% (eutrofización del agua dulce), con valores finales de 0.8337, 0.8933, 1.1273 kg 1.4-DBC eq y  $1.2600 \times 10^{-2}$  kg P eq respectivamente, así mismo, en este escenario la mayor disminución se registra para la categoría de calentamiento global, con un 8.54%, ya que desciende desde 29.1070 hasta 26.6115 kg  $\text{CO}_2$  eq, pues la emisión de metano desaparece.

El escenario 4 con aprovechamiento de metano registra valores de 1.5204 kg 1.4-DBC eq en el potencial de toxicidad cancerígena humana, 1.5806 kg 1.4-DBC eq en el de ecotoxicidad de agua dulce, 1.9969 kg 1.4-DBC eq para el de ecotoxicidad marina y  $1.6147 \times 10^{-2}$  kg P eq en eutrofización del agua dulce, es decir, existe una disminución de 0.044%, 0.037%, 0.038% y 0.025% respectivamente para cada categoría, de igual forma, la mayor disminución es del 4.962 % y se obtiene en la categoría de calentamiento global, con un valor final de 46,2624 kg  $\text{CO}_2$  eq, nuevamente, la disminución del impacto en esta categoría está directamente relacionado al aprovechamiento del metano y la eliminación de su emisión al aire.

### Figura 11

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

*Normalización de escenarios con aprovechamiento de metano como fuente de energía.*



### ***1.12.3. Impactos potenciales del vertimiento.***

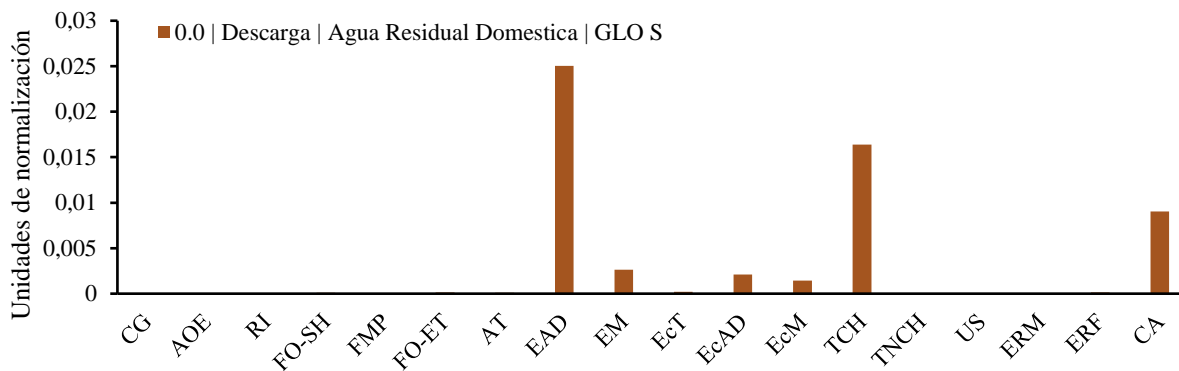
En la Figura 12 se observa que los impactos ambientales normalizados más significativos generados por el vertimiento del agua residual afectan directamente a las categorías de eutrofización del agua dulce ( $1.6264 \times 10^{-2}$  kg P eq), toxicidad cancerígena humana (0.1686 kg 1,4-DBC eq), consumo de agua ( $2.4061 \text{ m}^3$ ) y eutrofización marina ( $1.2117 \times 10^{-2}$  kg N eq), todas justificadas en el contenido de compuestos orgánicos e inorgánicos del agua residual doméstica.

Solamente la categoría de eutrofización del agua dulce supera los impactos generados por la operación de los sistemas de tratamiento piloto, esto de ninguna forma quiere decir que la implementación de sistemas de tratamiento trae un impacto más negativo que el vertimiento crudo del agua residual, ya que por ejemplo, las categorías de toxicidad no cancerígena humana puede estar subestimadas debido a la ausencia de parámetros para caracterizar y normalizar las cuantificaciones de coliformes totales y fecales, pues no están contempladas en el software, además, como ya se describió anteriormente, los impactos de plantas de tratamiento pequeñas, como es el caso de los pilotos, son mayores debido a la optimización del consumo eléctrico por metro cubico de agua tratada.

**Figura 12.**

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

*Normalización Impactos ambientales potenciales generados por la descarga de agua residual doméstica*



Los escenarios acoplados con microalgas realizaron una remoción efectiva de la DQO, DBO<sub>5</sub>, PO<sub>4</sub> y NO<sub>3</sub>, con porcentajes de remoción mayores al 95%, exceptuando la remoción alcanzada por el escenario 4, donde la remoción para la DQO fue del 89%, lo cual concuerda con lo reportado por Makut et al., (2019), quien también menciona que la remoción de la mayor parte de carga orgánica recae en cepas bacterianas mientras que las microalgas remueven compuestos inorgánicos como los nitratos y fósforo, así mismo, los consorcios Microalga-bacteria registran mayores producciones de biomasa debido al movimiento de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> entre estos microorganismos (Mujtaba et al., 2016).

El acople con cultivos de microalgas aumenta la puntuación de los impactos ambientales, aun cuando se proponen cultivos con fotoperiodo de luz solar, esto debido a que los estanques de microalgas de alta tasa requieren inyección de CO<sub>2</sub>, agitación y bombeo, lo cual se traduce en un gasto energético, por esta razón es que en cualquier comparación del escenario base y su contraparte acoplada con microalgas podemos ver el alza en el potencial de todos los impactos.

En términos generales, el acople de efluentes residuales tratados no presenta una mejora en los impactos ambientales de operación puesto que se requiere energía eléctrica para promover

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS**

eficientemente el crecimiento de microalgas (Magalhães et al., 2021a), sin embargo, los impactos pueden ser mitigados incluyendo la reutilización de productos del mismo sistema, implementando equipos ahorradores (Wu et al., 2020), mejorando las variables de operación (Pretel et al., 2016) o aplicando fuentes de energía más limpias, ajenas a la matriz energética, como los paneles fotovoltaicos.

El uso de tecnologías con bajo consumo energético como humedales construidos, lagunas de maduración o lagunas de microalgas de alta tasa son la opción más viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeñas comunidades (Garfí et al. 2017), sin embargo, estas requieren de áreas extensas para su ejecución, es decir, la fase de construcción juega un papel importante en el análisis de impactos ambientales (Dixon et al., 2003; Fuchs et al., 2011; Garfí et al., 2017; Machado et al., 2007), ya que puede aumentar el potencial de impacto de la categoría de uso del suelo, la cual es bastante sensible a la transformación y ocupación de suelos sin intervención antrópica. Es por esto por lo que para comunidades con proyección de crecimiento deben considerarse otros sistemas con alta capacidad de tratamiento de agua residual, como es el caso de AS y UASB.

El enfoque de plantas de tratamiento de agua residual debe empezar a cambiar hacia una perspectiva de economía circular, donde las instalaciones no solo se encarguen de la regeneración de agua, sino también, de investigación en sistemas para la generación de subproductos valiosos, recuperación de nutrientes y producción de energía (Foglia et al., 2021)

### ***1.12.4. Biomasa de Microalgas***

En la Figura 13 se observan los impactos ambientales generados por la producción de biomasa en el escenario 2 y 4, cuyas categorías más afectadas son las mismas registradas en la operación del sistema, toxicidad cancerígena humana, ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS

marina y eutrofización del agua dulce, no obstante, los puntajes son variados dependiendo del tipo de sistema del cual se obtuvo.

Para el escenario 2 la producción de biomasa de *Chlorella* sp, fue de los 0.18 kg por m<sup>3</sup> de agua tratada, la cual fue baja en comparación con el escenario 4, esto debido probablemente a la baja biodisponibilidad de nitrógeno en el caudal de entrada a los cultivos, sin embargo, la alta remoción de PO<sub>4</sub> sugiere un comportamiento distinto al de crecimiento en las células fotosintéticas, como alguna forma de producción o almacenamiento de metabolitos celulares (Guerra-Renteria et al., 2019; Yanyan Su, 2021; Suárez Quintana et al., 2022). Los potenciales son mayores en tres de las cuatro categorías mayormente afectadas, 1.6033x10<sup>-2</sup> kg 1,4-DBC eq para toxicidad cancerígena humana, 1.6976x10<sup>-2</sup> kg 1,4-DBC eq en ecotoxicidad de agua dulce y 2.1530x10<sup>-2</sup> kg 1,4-DBC eq de ecotoxicidad marina. El potencial de eutrofización del agua dulce fue 37.80% menos contaminante (1.053 x10<sup>-4</sup> kg P eq) que el calculado para el escenario 4,

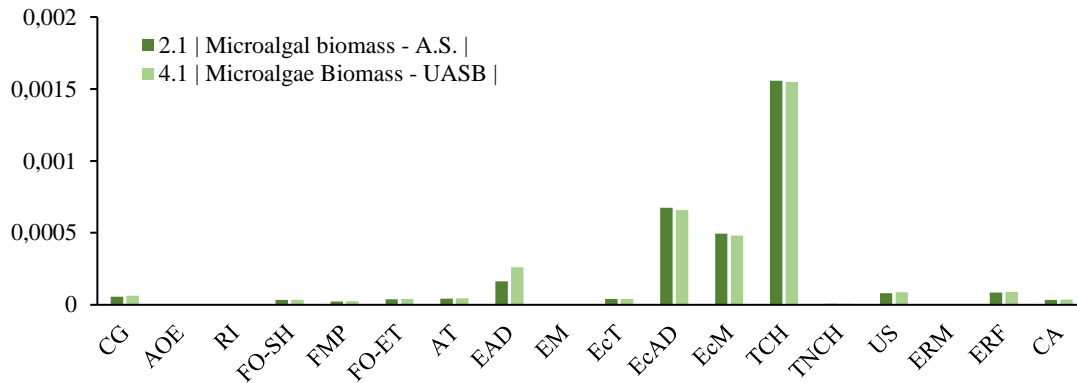
Por otro lado, el escenario 4 produjo 0.867 kg de biomasa por m<sup>3</sup> de agua tratada, lo cual es casi cinco veces mayor que lo obtenido en el escenario 2, probablemente por la mayor disponibilidad de nutrientes en el caudal de salida del tratamiento anaerobio y la simbiosis de bacteria-microalgas (Makut et al., 2019). En cuanto a las cuatro categorías mayormente afectadas, el potencial de eutrofización del agua dulce (1.6929x10<sup>-4</sup> kg P eq) fue mayor que el escenario 2, mientras que las otras tres fueron ligeramente menores, 1.5952x10<sup>-2</sup> kg 1,4-DBC eq obtenidos para toxicidad cancerígena humana, 1.6737x10<sup>-2</sup> kg 1,4-DBC eq para ecotoxicidad de agua dulce y 2.0946x10<sup>-2</sup> kg 1,4-DBC eq en ecotoxicidad marina.

Magalhães et al., (2021) describe que el escenario base de UASB cuenta con potenciales de impacto relativamente bajos, lo cual puede deberse a la alta productividad de agua tratada y además establece que la implementación de microalgas es la mejor alternativa para remover

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

nutrientes como nitrógeno y fosforo, en comparación con opciones como la volatilización o precipitación química.

**Figura 13.** Normalización de impactos ambientales potenciales de la producción de biomasa.



Este estudio demuestra nuevamente que la producción de biomasa de microalgas es factible en aguas residuales tratadas y ésta depende no solo de la calidad del efluente sino del sistema de tratamiento empleado, además, para mejorar el rendimiento ambiental del sistema y mejorar la producción de biomasa se puede emplear CO<sub>2</sub> residual como fuente de carbono. Los prospectos de aprovechamiento de la biomasa son muy variados, desde su refinación para la obtención de biocombustibles y otros metabolitos de interés industrial, hasta la digestión anaerobia para la producción de energía, lo cual puede reducir la generación de gases de efecto invernadero (P. Choudhary et al., 2015).

### 1.13. Fase 3: Análisis de sensibilidad e incertidumbre

#### 1.13.1. Análisis de incertidumbre

En la Tabla 7 se describen los parámetros que aportan incertidumbre al modelo, estos corresponden a los asumidos y extraídos de la bibliografía.

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

**Tabla 7.**

*Parámetros de incertidumbre.*

Parámetro	valor	Unidad	Referencia
<b>Consumo energético en cultivo de microalgas en estanques de alta tasa con rueda de paletas</b>	21.938	kWh	(Magalhães et al., 2021a)
<b>Producción de metano en los sistemas anaerobios</b>	0.0672	kg	(Santos et al., 2016)
<b>Caracterización de metales vertidos en el Efluente tratado</b>	$7.0 \times 10^{-5}$	Iron (kg)	(Güereca et al., 2011)
	$1.0 \times 10^{-5}$	Manganese (kg)	
	$8.0 \times 10^{-5}$	Lead (kg)	
	$8.0 \times 10^{-5}$	Cadmium (kg)	
	$4.0 \times 10^{-7}$	Mercury (kg)	
	$1.0 \times 10^{-5}$	Arsenic (kg)	
	$5.0 \times 10^{-5}$	Chromium (kg)	
	$5.0 \times 10^{-5}$	Zinc (kg)	
<b>Energía obtenida del aprovechamiento del metano</b>	1.05	kWh	(Suhartini et al., 2019)
<b>Base fertilizante producida por lodos activados en exceso</b>	5.2	kg	Asumido de los lodos en exceso secos producidos durante la operación del sistema piloto de AS.

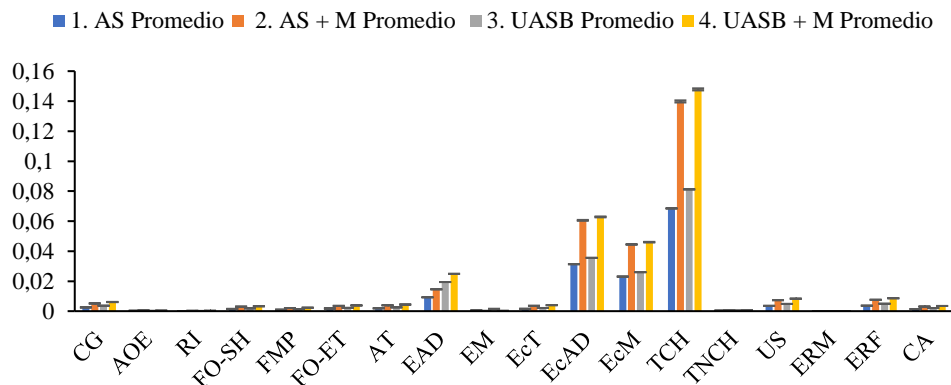
Se realizó el análisis de incertidumbre mediante el modelo de Montecarlo con 1000 simulaciones y un intervalo de confianza del 95% ( $k=2$ ). La incertidumbre se calculó empleando la matriz de pedigrí con distribuciones lognormal en cada parámetro de incertidumbre identificado en el modelo.

**1.13.1.1. Desviación estándar de los escenarios 1, 2, 3 y 4.** En la Figura 14 se muestran las desviaciones de cada escenario de acuerdo con los parámetros de incertidumbre. La desviación estándar calculada para los escenarios no supera el 2.6% de los valores promedio, y esto solo se presentó para la categoría calentamiento global ( $29,1132 \pm 0,7450$  kg CO<sub>2</sub> eq) del escenario 3, la cual está directamente relacionada a la emisión de metano.

**Figura 14.**

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Desviación estándar de los escenarios

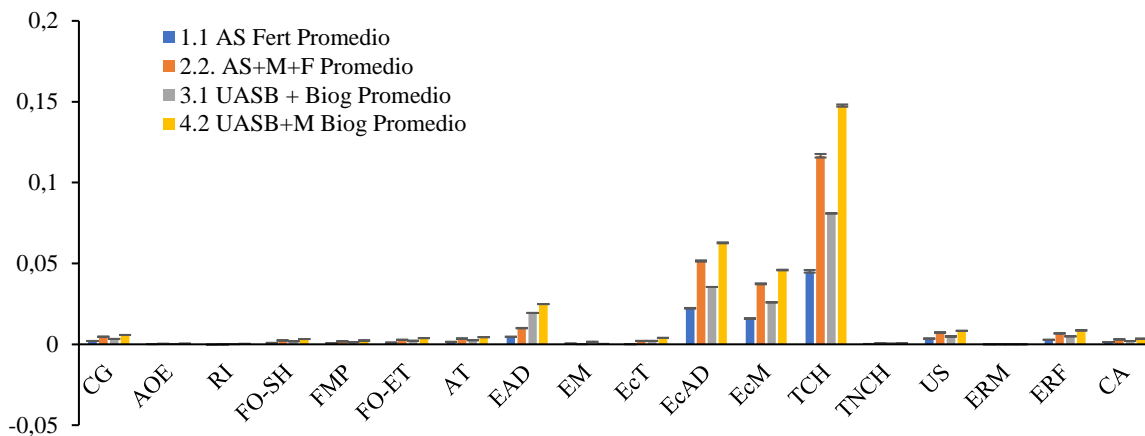


**1.13.1.2. Desviación estándar de los escenarios con aprovechamiento de residuo/emisión.** La Figura 15 muestra la dispersión de los escenarios con aprovechamiento de lodos en exceso y producción de metano. La mayor dispersión de valores calculada fue del 89.92% para la categoría de ecotoxicidad terrestre ( $1.4197 \pm 1.2765$  kg 1,4-DCB) del escenario 1 teniendo en cuenta el reúso del lodo en exceso como fertilizante, lo cual está directamente afectado por la variación en la disposición final de este y su incertidumbre. La radiación ionizante del escenario 2 posee un impacto positivo y una variación del 24.11% ( $3.6052 \times 10^{-2} \pm 8.6929 \times 10^{-3}$  kBq Co-60 eq) del valor promedio, esto también se presenta en función al reúso de lodos en exceso, el cual mitiga el potencial de impacto aportado por el vertimiento simulado y el consumo eléctrico. En cuanto a los demás escenarios y sus categorías de impacto, las desviaciones calculadas no superan el 8.5% de los valores promedio, y las categorías con mayor puntuación de impacto no superan el 3% de variación.

### Figura 15.

*Desviación estándar de los escenarios con aprovechamiento de residuo/emisión*

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

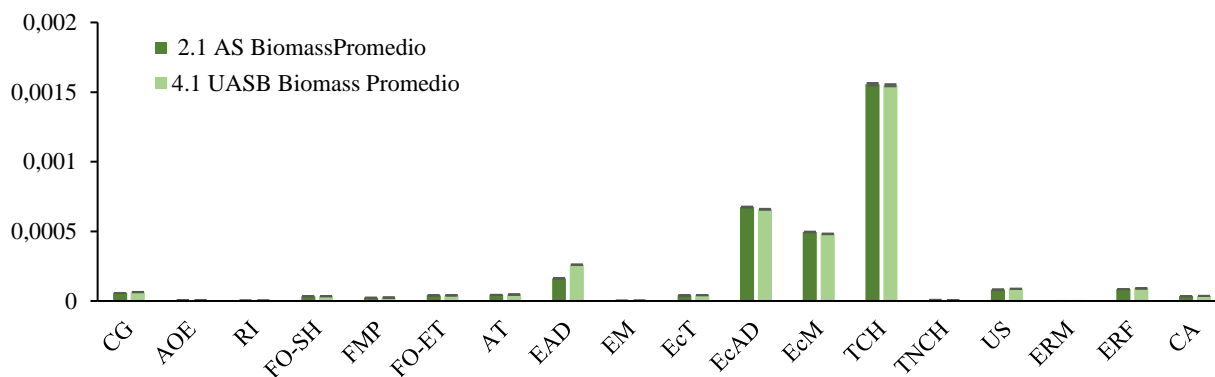


De forma general se puede decir que los escenarios que plantean el reúso de los residuos en exceso como fertilizante y el aprovechamiento de metano presentan las mayores incertidumbres, sin embargo, estos factores no afectan en gran medida las categorías de impacto mayormente afectadas por la operación del sistema.

**1.13.1.3. Desviación estándar de la producción de biomasa.** La Figura 16 muestra las dispersiones calculadas para la producción de biomasa y se observa que la mayor desviación obtenida fue del 1,66% del valor promedio para la categoría de calentamiento global ( $0,5106 \pm 0,0085$  kg CO<sub>2</sub> eq) en el escenario 4, el cual está directamente afectado por la incertidumbre en la emisión de metano.

**Figura 16.**

*Desviación estándar de impactos potenciales de la producción de biomasa.*



# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## 1.13.2. Análisis de sensibilidad

En la tabla Tabla 8 se muestra la variación de los parámetros de incertidumbre para desarrollar el análisis de sensibilidad de los impactos ambientales, se modificaron los escenarios haciendo variaciones del -10% y 10% a cada parámetro identificado. La sensibilidad de los impactos se calculó como el porcentaje de diferencia respecto al valor calculado originalmente, de forma similar a lo propuesto por Q.-L. Wang et al., (2016).

**Tabla 8.**

*Parámetros para el análisis de sensibilidad*

Parámetro	Unidad	-10%	Valor original	10%
<b>Consumo energético en cultivo de microalgas en estanques de alta tasa con rueda de paletas</b>	kWh	19.74	21.94	24.13
<b>Producción de metano en los sistemas anaerobios</b>	kg	0.06048	0.0672	0.07392
	Iron (kg)	6.3 x10 <sup>-5</sup>	7.0 x10 <sup>-5</sup>	7.7 x10 <sup>-5</sup>
	Manganese (kg)	9.0x10 <sup>-6</sup>	1.0 x10 <sup>-5</sup>	1.1 x10 <sup>-5</sup>
	Lead (kg)	7.2x10 <sup>-5</sup>	8.0x10 <sup>-5</sup>	8.8x10 <sup>-5</sup>
	Cadmium (kg)	7.2x10 <sup>-5</sup>	8.0x10 <sup>-5</sup>	8.8x10 <sup>-5</sup>
<b>Caracterización de metales vertidos en el efluente tratado</b>				
	Mercury (kg)	3.6x10 <sup>-7</sup>	4.0x10 <sup>-7</sup>	4.4x10 <sup>-7</sup>
	Arsenic (kg)	9.0x10 <sup>-6</sup>	1.0 x10 <sup>-5</sup>	1.1 x10 <sup>-5</sup>
	Chromium (kg)	4.5x10 <sup>-5</sup>	5.0x10 <sup>-5</sup>	5.5x10 <sup>-5</sup>
	Zinc (kg)	4.5x10 <sup>-5</sup>	5.0x10 <sup>-5</sup>	5.5x10 <sup>-5</sup>
	Copper (kg)	3.6x10 <sup>-5</sup>	4.0x10 <sup>-5</sup>	4.4x10 <sup>-5</sup>
<b>Energía obtenida del aprovechamiento del metano</b>	kWh	0,95	1,05	1,16
<b>Base fertilizante producida por lodos activados en exceso</b>	kg	4.68	5.2	5.72

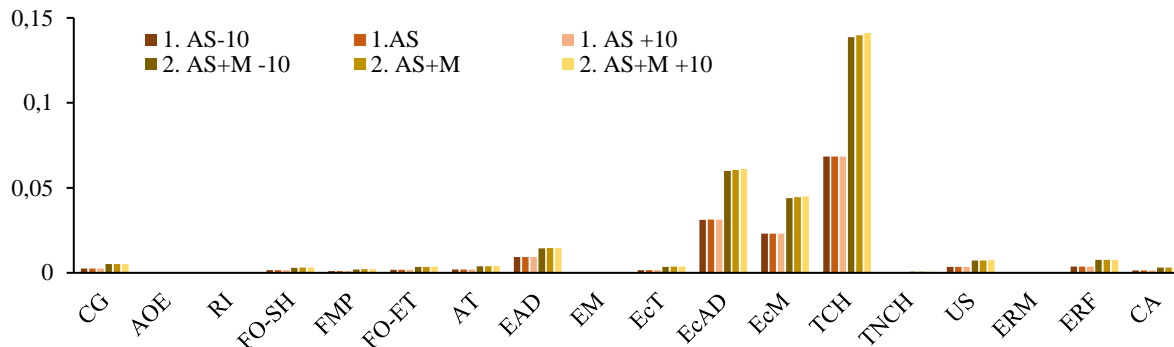
En la Figura 17 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad desarrollados para el escenario 1 y 2. Se calculó que la sensibilidad para el escenario 2 no es mayor al  $\pm 1\%$ , además, se observa la existencia de una relación directamente proporcional entre los impactos de las

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

categorías mayormente afectadas (toxicidad cancerígena humana, ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad marina y eutrofización del agua dulce) y las modificaciones realizadas a los parámetros de incertidumbre, el mismo comportamiento se presentan para el escenario 1, sin embargo, la sensibilidad para este fue del 0.09%, lo que permite inferir que los metales pesados, en las concentraciones descritas, no parecen afectar en gran medida la sensibilidad de los escenarios.

**Figura 17.**

*Sensibilidad de los escenarios 1 y 2.*



*Nota.* La grafica muestra el comportamiento de los impactos ambientales potenciales normalizados en función de las modificantes realizadas a los parámetros de incertidumbre. Las series que poseen el -10 al final corresponden a las consideraciones realizadas con los valores del -10%, así mismo, el +10 corresponden a aquellas de +10%, la serie sin número final es el valor originalmente calculado.

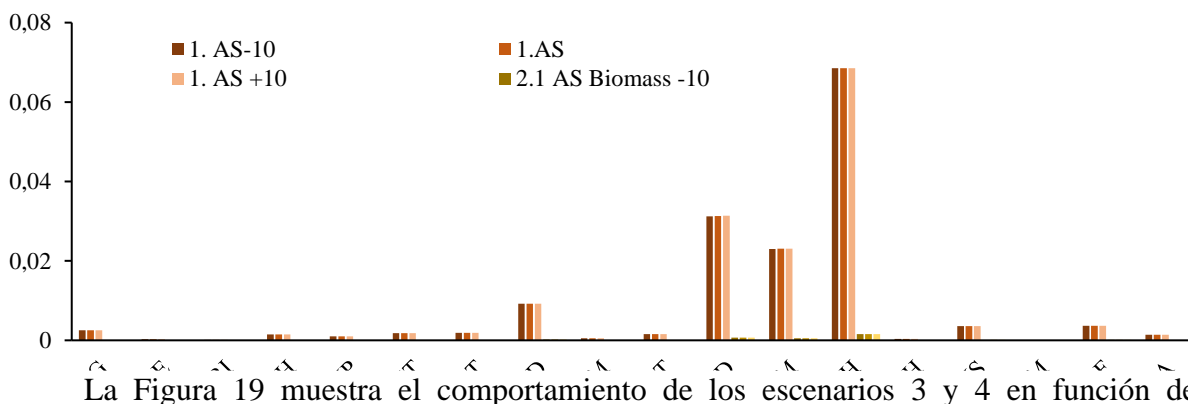
La Figura 18 muestra el análisis de sensibilidad del escenario 1 y 2 teniendo en cuenta el reúso de lodos en exceso como fertilizante, donde se observó una relación inversamente proporcional para el escenario 1, puesto que los impactos ambientales disminuyen a medida que aumentan los valores modificados, obteniéndose una sensibilidad máxima de 2.65%, así mismo, el escenario 2 con reúso del lodo en exceso también muestra tendencia decreciente en sus impactos

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

ambientales, pero la mayor sensibilidad calculada fue del 0.025%. La tendencia decreciente demuestra que las rutas de aprovechamiento de residuos, como el lodo en exceso, benefician a cualquier escenario, sin embargo en este caso específico, el escenario 2 no es tan sensible a esto, ya que cuenta con otros parámetros de incertidumbre que se contraponen a la disminución de impactos, como el aumento del consumo eléctrico.

### Figura 18.

*Sensibilidad escenarios 1 y 2 con reúso de lodo en exceso como base fertilizante.*

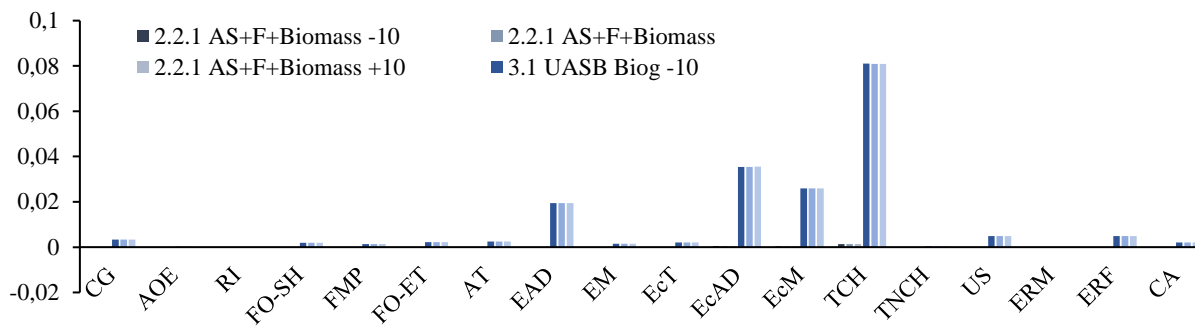


La Figura 19 muestra el comportamiento de los escenarios 3 y 4 en función de la modificación de los parámetros de incertidumbre. Se observa una relación directamente proporcional del potencial de impacto con las modificaciones propuestas, ya que ambas aumentan, esto se justifica en el consumo eléctrico y la emisión de metano. Se calcularon sensibilidades no mayores al 0.09% para el escenario 3 y 0.86% para el escenario 4, lo cual demuestra que la simulación de los escenarios anaerobios es más robusta, puesto que es menos sensible que los escenarios aerobios a la variación de los parámetros de incertidumbre.

### Figura 19.

*Sensibilidad de los escenarios 3 y 4*

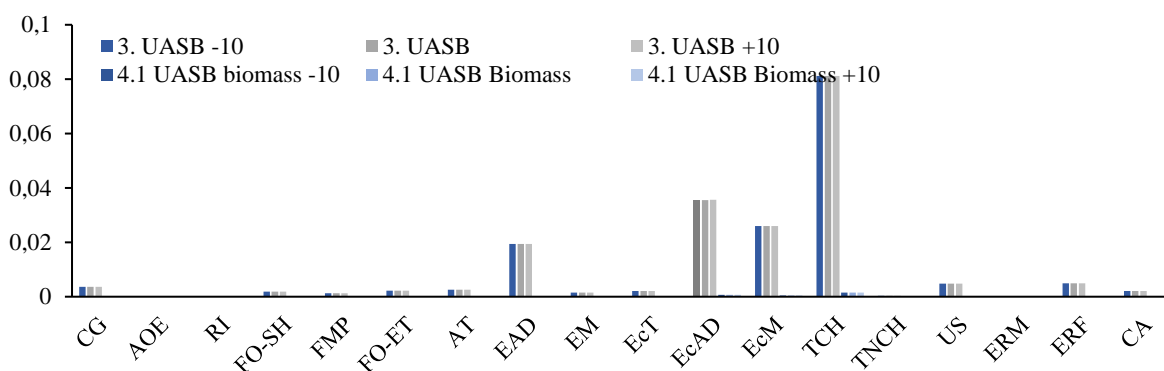
## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS



La Figura 20 muestra la variación de los potenciales de impacto de los escenarios 3 y 4 modificados con aprovechamiento del metano, los cuales también presentan una relación directamente proporcional con las modificaciones propuestas, y sus respectivas sensibilidades no superan el 0.05% y 0.9%. Esto quiere decir que el aprovechamiento de metano realmente no tiene un aporte significativo al momento de disminuir los impactos ambientales, ya que no logra superar la tendencia creciente del potencial de los impactos que aportan los demás parámetros modificados, además, la baja sensibilidad reitera la robustez de la simulación.

### Figura 20.

*Escenarios 3 y 4 con aprovechamiento de metano.*



En cuanto a la producción de biomasa se presenta la Figura 21 la cual describe el comportamiento de los potenciales de impacto en función de las variaciones para el análisis de sensibilidad. Se analizó que existe una relación directamente proporcional al aumento de los



# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Conclusiones

De acuerdo con el análisis de los flujos de materia y energía involucrados en los escenarios de operación de las plantas piloto de AS y UASB, y sus respectivos acoples con microalgas, permitió establecer que los consumos energéticos oscilan entre los 104.75 y 165.688 kWh por m<sup>3</sup> de agua tratada. UASB registra los requerimientos eléctricos más elevados ya que las potencias de las bombas peristálticas de funcionamiento continuo eran mayores que las empleadas por el sistema de AS.

En la evaluación del potencial de impactos ambientales se obtuvo que el consumo eléctrico es el flujo potenciador de impactos y afecta a 4 categorías en todos los escenarios: toxicidad cancerígena humana, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina y eutrofización del agua dulce. La distribución normalizada de estas 4 categorías alcanzó valores entre los 43% a 47% para toxicidad cancerígena humana, 19% a 20% para ecotoxicidad de agua dulce, 14% a 15% en ecotoxicidad marina y 5% a 10% en eutrofización de agua dulce.

En cuanto a la sostenibilidad de los sistemas, el escenario 1 cumple con los parámetros de vertimiento regulados por la normatividad vigente, ya que remueve eficientemente la carga contaminante y su potencial de impactos es menor en comparación con los demás escenarios, sin embargo, desde la perspectiva circular del agua, el escenario 4 es la mejor opción en términos de producción de biomasa y simultaneo refinamiento del efluente tratado, ya sus impactos pueden mitigarse explorando alternativas de aprovechamiento de las emisiones y optimización de consumo eléctrico.

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS**

En general se evidencia que el ACV en sistemas piloto permite establecer no solo los impactos ambientales asociados a la operación sino también el análisis de alternativas de mitigación.

# **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS**

## **Recomendaciones**

La optimización de los consumos energéticos y la operación de los sistemas para aumentar la cantidad de agua residual tratada son factores clave para la mitigación de los impactos ambientales, por eso se recomienda emplear fuentes de energía separadas de la matriz eléctrica, como paneles fotovoltaicos o aprovechamiento del biogás generado en los sistemas anaerobios.

En el marco del cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, es importante aplicar el concepto de economía circular en la gestión del recurso hídrico, ya que busca el desarrollo de parques tecnológicos que no solamente regeneren la calidad del agua, sino que promuevan el aprovechamiento de emisiones y otros residuos para mitigar los impactos ambientales, promoviendo simultáneamente la generación de proyectos productivos que impacten de forma positiva a las comunidades y la innovación tecnológica regional.

# **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

## **Evento**

El proyecto fue presentado en la IX Semana Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2022, en modalidad Oral desarrollada los días 29 de noviembre al 2 de diciembre de 2022 en la ciudad de Cúcuta (Colombia), en la Universidad Francisco de Paula Santander.

# ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

## Referencias Bibliográficas

ACOLGEN. (2020). *La energía que impulsa a Colombia (Capacidad instalada en Colombia)*.

Retrieved from <https://www.acolgen.org.co/>

Ahangarnokolaei, M. A., Attarian, P., Ayati, B., Ganjidoust, H., & Rizzo, L. (2021). Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). doi: 10.1016/j.jece.2021.106251

Ahmed, M., Ahmad, S., Fayyaz-ul-Hassan, Qadir, G., Hayat, R., Shaheen, F. A., & Raza, M. A. (2019). Innovative processes and technologies for nutrient recovery from wastes: A comprehensive review. *Sustainability (Switzerland)*, 11(18). doi: 10.3390/su11184938

Ahmed, W., Núñez-Delgado, A., Mehmood, S., Ali, S., Qaswar, M., Shakoor, A., & Chen, D.-Y. (2021). Highly efficient uranium (VI) capture from aqueous solution by means of a hydroxyapatite-biochar nanocomposite: Adsorption behavior and mechanism. *Environmental Research*, 201. doi: 10.1016/j.envres.2021.111518

Akpor, O. B. (2011). Wastewater Effluent Discharge: Effects and Treatment Processes. *3rd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering*, 20, 85–91.

Alagawany, M., Taha, A. E., Noreldin, A., El-Tarabily, K. A., & Abd El-Hack, M. E. (2021). Nutritional applications of species of Spirulina and Chlorella in farmed fish: A review. *Aquaculture*, 542. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.736841

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Al-Anbari, M. A., Altaee, S. A., & Kareem, S. L. (2022). Using Life Cycle Assessment (LCA) in Appraisal Sustainability Indicators of Najaf Wastewater Treatment Plant. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(9), 513–519. doi: 10.21608/EJCHEM.2022.113093.5139
- Al-Baldawi, I. A., Mohammed, A. A., Mutar, Z. H., Abdullah, S. R. S., Jasim, S. S., Almansoori, A. F., & Ismail, N. ' . (2021). Application of phytotechnology in alleviating pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in wastewater: Source, impacts, treatment, mechanisms, fate, and SWOT analysis. *Journal of Cleaner Production*, 319. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128584
- Alyaseri, I., & Zhou, J. (2017). Towards better environmental performance of wastewater sludge treatment using endpoint approach in LCA methodology. *Heliyon*, 3(3). doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00268
- Angulo-Mosquera, L. S., Alvarado-Alvarado, A. A., Rivas-Arrieta, M. J., Cattaneo, C. R., Rene, E. R., & García-Depraect, O. (2021). Production of solid biofuels from organic waste in developing countries: A review from sustainability and economic feasibility perspectives. *Science of the Total Environment*, 795. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148816
- Arias, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020a). Environmental profile of decentralized wastewater treatment strategies based on membrane technologies. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Advanced Membrane Separation Processes for Sustainable Water and Wastewater Management - Case Studies and Sustainability Analysis* (pp. 259–287). Department of Chemical Engineering, Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, Galicia, Spain. doi: 10.1016/B978-0-12-819854-4.00011-3

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Arias, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020b). Linking organic matter removal and biogas yield in the environmental profile of innovative wastewater treatment technologies. *Journal of Cleaner Production*, 276. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124292
- Arias, A., Rama, M., González-García, S., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020). Environmental analysis of servicing centralised and decentralised wastewater treatment for population living in neighbourhoods. *Journal of Water Process Engineering*, 37. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101469
- Arun, J., Gopinath, K. P., SundarRajan, P., Felix, V., JoselynMonica, M., & Malolan, R. (2020). A conceptual review on microalgae biorefinery through thermochemical and biological pathways: Bio-circular approach on carbon capture and wastewater treatment. *Bioresource Technology Reports*, 11. doi: 10.1016/j.biteb.2020.100477
- Ashokkumar, V., Flora, G., Venkatkarthick, R., SenthilKannan, K., Kuppam, C., Mary Stephey, G., Kamyab, H., Chen, W.-H., Thomas, J., & Ngamcharussrivichai, C. (2022). Advanced technologies on the sustainable approaches for conversion of organic waste to valuable bioproducts: Emerging circular bioeconomy perspective. *Fuel*, 324. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124313
- Baaqel, H., Díaz, I., Tulus, V., Chachuat, B., Guillén-Gosálbez, G., & Hallett, J. P. (2020). Role of life-cycle externalities in the valuation of protic ionic liquids-a case study in biomass pretreatment solvents. *Green Chemistry*, 22(10), 3132–3140. doi: 10.1039/d0gc00058b
- Bagley, D. M. (2000). Life cycle analysis of municipal wastewater treatment. *2000 Annual Conference Abstracts - Canadian Society for Civil Engineering*, 93. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-21844431886&partnerID=40&md5=2c4905f33bea02d770609da3f4ff2826>

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Bai, R., Su, P., Guo, Z., Nguyen, T. T., Diao, Y., Heimann, K., & Zhang, W. (2021). An efficient protein isolation process for use in *Limnospira maxima*: A biorefinery approach. *Journal of Food Composition and Analysis*, *104*. doi: 10.1016/j.jfca.2021.104173
- Bai, S., Wang, X., Huppes, G., Zhao, X., & Ren, N. (2017). Using site-specific life cycle assessment methodology to evaluate Chinese wastewater treatment scenarios: A comparative study of site-generic and site-specific methods. *Journal of Cleaner Production*, *144*, 1–7. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.172
- Banti, D. C., Tsangas, M., Samaras, P., & Zorpas, A. (2020). LCA of a membrane bioreactor compared to activated sludge system for municipal wastewater treatment. *Membranes*, *10*(12), 1–15. doi: 10.3390/membranes10120421
- Bartholomew, T. v., & Mauter, M. S. (2016). Multiobjective optimization model for minimizing cost and environmental impact in shale gas water and wastewater management. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *4*(7), 3728–3735. doi: 10.1021/acssuschemeng.6b00372
- Bauenova, M. O., Sadvakasova, A. K., Mustapayeva, Z. O., Kokociński, M., Zayadan, B. K., Wojciechowicz, M. K., Balouch, H., Akmukhanova, N. R., Alwasel, S., & Allakhverdiev, S. I. (2021). Potential of microalgae *Parachlorella kessleri* Bh-2 as bioremediation agent of heavy metals cadmium and chromium. *Algal Research*, *59*. doi: 10.1016/j.algal.2021.102463
- Beavis, P., & Lundie, S. (2003). Integrated environmental assessment of tertiary and residuals treatment - LCA in the wastewater industry. *Water Science and Technology*, *47*(7–8), 109–116. doi: 10.2166/wst.2003.0678
- Belalcázar-Saldarriaga, A., Prato-García, D., & Vasquez-Medrano, R. (2018). Photo-Fenton processes in raceway reactors: Technical, economic, and environmental implications during

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- treatment of colored wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 182, 818–829. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.058
- Betancur-Ramírez, K. J., Meneses-Jácome, A., Ruiz-Colorado, A. A., & Gallego-Suárez, D. (2021). Life cycle assessment of an alternative enzymatic-biological treatment for effluents from industrial processing of potatoes. *Journal of Cleaner Production*, 324. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129151
- Boldrin, M. T. N., Formiga, K. T. M., & Pacca, S. A. (2022). Environmental performance of an integrated water supply and wastewater system through life cycle assessment — A Brazilian case study. *Science of The Total Environment*, 835, 155213. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155213
- Bourque, J.-S., Guiot, S. R., & Tartakovsky, B. (2008). Methane production in an UASB reactor operated under periodic mesophilic–thermophilic conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, 100(6), 1115–1121. doi: 10.1002/bit.21850
- Brunhoferova, H., Venditti, S., Schlien, M., & Hansen, J. (2021). Removal of 27 micropollutants by selected wetland macrophytes in hydroponic conditions. *Chemosphere*, 281. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130980
- Buonocore, E., Mellino, S., de Angelis, G., Liu, G., & Ulgiati, S. (2018). Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecological Indicators*, 94, 13–23. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.04.047
- Buscio, V., López-Grimau, V., Álvarez, M. D., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2019). Reducing the environmental impact of textile industry by reusing residual salts and water: ECUVal system. *Chemical Engineering Journal*, 373, 161–170. doi: 10.1016/j.cej.2019.04.146

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Bussa, M., Zollfrank, C., & Röder, H. (2020). Life-cycle assessment and geospatial analysis of integrating microalgae cultivation into a regional economy. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118630. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118630
- Caballero, J. A., Labarta, J. A., Quirante, N., Carrero-Parreño, A., & Grossmann, I. E. (2020). Environmental and economic water management in shale gas extraction. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4). doi: 10.3390/su12041686
- Calicioglu, O., Femeena, P. v, Mutel, C. L., Sills, D. L., Richard, T. L., & Brennan, R. A. (2021). Techno-economic Analysis and Life Cycle Assessment of an Integrated Wastewater-Derived Duckweed Biorefinery. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(28), 9395–9408. doi: 10.1021/acssuschemeng.1c02539
- Cañote, S. J. B., Barros, R. M., Lora, E. E. S., dos Santos, I. F. S., Silva, A. P. M., Piñas, J. A. V., Cañote, A. L. B., & de Castro e Silva, H. L. (2021). Life cycle assessment of upflow anaerobic sludge blanket sludge management and activated sludge systems aiming energy use in the municipality of Itajubá, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(5), 1810–1830. doi: 10.1007/s10163-021-01253-0
- Cardoso, L. G., Lombardi, A. T., de Jesus Silva, J. S., Lemos, P. V. F., Costa, J. A. v, de Souza, C. O., Druzian, J. I., & Chinalia, F. A. (2021). Scaling-up production of *Spirulina* sp. LEB18 grown in aquaculture wastewater. *Aquaculture*, 544. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737045
- Cen, K., Chen, F., Chen, D., Gan, Z., Zhuang, X., & Zhang, H. (2022). Life cycle assessment of torrefied cornstalk pellets combustion heating system. *Fuel*, 320. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123968

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Chang, H., Fu, Q., Zhong, N., Yang, X., Quan, X., Li, S., Fu, J., & Xiao, C. (2019). Microalgal lipids production and nutrients recovery from landfill leachate using membrane photobioreactor. *Bioresource Technology*, 277, 18–26. doi: 10.1016/j.biortech.2019.01.027
- Chen, J., Xu, W., Wu, X., E, J., Lu, N., Wang, T., & Zuo, H. (2019). System development and environmental performance analysis of a pilot scale microbial electrolysis cell for hydrogen production using urban wastewater. *Energy Conversion and Management*, 193, 52–63. doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.060
- Chen, J., Xu, W., Zuo, H., Wu, X., Jiaqiang, E., Wang, T., Zhang, F., & Lu, N. (2019). System development and environmental performance analysis of a solar-driven supercritical water gasification pilot plant for hydrogen production using life cycle assessment approach. *Energy Conversion and Management*, 184, 60–73. doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.041
- Chen, M., Li, X., Zhang, Q., Wang, C., Hu, H., Wang, Q., & Zeng, C. (2021). Phosphate removal from aqueous solution by electrochemical coupling siderite packed column. *Chemosphere*, 280. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130805
- Chia, S. R., Chew, K. W., Show, P. L., Yap, Y. J., Ong, H. C., Ling, T. C., & Chang, J.-S. (2018). Analysis of Economic and Environmental Aspects of Microalgae Biorefinery for Biofuels Production: A Review. *Biotechnology Journal*, 13(6). doi: 10.1002/biot.201700618
- Choudhary, P., Bhattacharya, A., Prajapati, S. K., Kaushik, P., & Malik, A. (2015). Phycoremediation-Coupled Biomethanation of Microalgal Biomass. In *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances* (pp. 483–499). Applied Microbiology Laboratory, Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology (IIT) Delhi, Hauz Khas, New Delhi, India. doi: 10.1016/B978-0-12-800776-1.00032-7

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Choudhary, V., Vellingiri, K., Thayyil, M. I., & Philip, L. (2021). Removal of antibiotics from aqueous solutions by electrocatalytic degradation. *Environmental Science: Nano*, *8*(5), 1133–1176. doi: 10.1039/d0en01276a
- Clauson-Kaas, J., Poulsen, T. S., Jacobsen, B. N., Guildal, T., & Wenzel, H. (2001). Environmental accounting - A decision support tool in WWTP operation and management. *Water Science and Technology*, *44*(2–3), 25–30. doi: 10.2166/wst.2001.0749
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J. S., Hospido, A., Larsen, H. F., Morera, S., & Shaw, A. (2013). Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. *Water Research*, *47*(15), 5480–5492. doi: 10.1016/j.watres.2013.06.049
- Corominas, Lluís, Byrne, D. M., Guest, J. S., Hospido, A., Roux, P., Shaw, A., & Short, M. D. (2020). The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. *Water Research*, *184*, 116058. doi: 10.1016/j.watres.2020.116058
- Cram, A., Espiritu, J., Taboada, H., & Walker, S. (2018). Environmental performance of a wastewater treatment plan applying life cycle assessment methodology. *IISE Annual Conference and Expo 2018*, 846–851. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85054009372&partnerID=40&md5=512f91284bfa9a296533bd5cfa1a7500>
- Dayana Priyadharshini, S., Suresh Babu, P., Manikandan, S., Subbaiya, R., Govarthan, M., & Karmegam, N. (2021). Phycoremediation of wastewater for pollutant removal: A green approach to environmental protection and long-term remediation. *Environmental Pollution*, *290*, 117989. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117989>

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- de Benedetti, B., Barbera, A. C., Freni, P., & Tecchio, P. (2015). Wastewater valorization adopting the microalgae accelerated growth. *Desalination and Water Treatment*, 53(4), 1001–1011. doi: 10.1080/19443994.2013.848412
- de Feo, G., & Ferrara, C. (2017). A procedure for evaluating the most environmentally sound alternative between two on-site small-scale wastewater treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, 164, 124–136. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.205
- de Oliveira Cardoso Nascimento, C., Veit, M. T., Palácio, S. M., & da Cunha Gonçalves, G. (2021). Use of Natural Coagulants in the Removal of Color and Turbidity from Laundry Wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(7). doi: 10.1007/s11270-021-05253-6
- de Souza, L., Lima, A. S., Matos, Â. P., Wheeler, R. M., Bork, J. A., Vieira Cubas, A. L., & Moecke, E. H. S. (2021). Biopolishing sanitary landfill leachate via cultivation of lipid-rich *Scenedesmus* microalgae. *Journal of Cleaner Production*, 303. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127094
- Diaz-Elsayed, N., Rezaei, N., Ndiaye, A., & Zhang, Q. (2020). Trends in the environmental and economic sustainability of wastewater-based resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 265. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121598
- Dimuro, J. L., Guertin, F. M., Helling, R. K., Perkins, J. L., & Romer, S. (2014). A financial and environmental analysis of constructed wetlands for industrial wastewater treatment. *Journal of Industrial Ecology*, 18(5), 631–640. doi: 10.1111/jiec.12129
- Dixon, A., Simon, M., & Burkitt, T. (2003). Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. *Ecological Engineering*, 20(4), 297–308. doi: 10.1016/S0925-8574(03)00007-7

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Dogaris, I., Loya, B., Cox, J., & Philippidis, G. (2019). Study of landfill leachate as a sustainable source of water and nutrients for algal biofuels and bioproducts using the microalga *Picochlorum oculatum* in a novel scalable bioreactor. *Bioresource Technology*, 282, 18–27. doi: 10.1016/j.biortech.2019.03.003
- Elkomy, R. G., & Ismail, M. M. (2021). Crude sulfated polysaccharides extracted from marine cyanobacterium *oscillatoria simplicissima* with evaluation antioxidant and cytotoxic activities. *Iranian Journal of Microbiology*, 13(4), 553–559. doi: 10.18502/ijm.v13i4.6983
- Erol, P., & Thming, J. (2006). ECO-optimization of pre-treatment processes in metal finishing. *Computers and Chemical Engineering*, 30(4), 587–598. doi: 10.1016/j.compchemeng.2005.10.010
- Fazal, T., Rehman, M. S. U., Javed, F., Akhtar, M., Mushtaq, A., Hafeez, A., Alaud Din, A., Iqbal, J., Rashid, N., & Rehman, F. (2021). Integrating bioremediation of textile wastewater with biodiesel production using microalgae (*Chlorella vulgaris*). *Chemosphere*, 281. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130758
- Ferreira, A. C. D., Oliveira, S., & Benassi, R. F. (2021). Comparison of alternative wastewater treatment plants using life cycle assessment (lca). In *Smart Innovation, Systems and Technologies: Vol. 198 SIST* (pp. 437–446). Universidade Federal do ABC, Santo André, SP 09210-580, Brazil. doi: 10.1007/978-3-030-55374-6\_43
- Ferreira, J., de Assis, L. R., Oliveira, A. P. D. S., Castro, J. D. S., & Calijuri, M. L. (2020). Innovative microalgae biomass harvesting methods: Technical feasibility and life cycle analysis. *Science of the Total Environment*, 746. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140939

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Figueroa-Torres, G. M., Pittman, J. K., & Theodoropoulos, C. (2021). Optimisation of microalgal cultivation via nutrient-enhanced strategies: the biorefinery paradigm. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1). doi: 10.1186/s13068-021-01912-2
- Filote, C., Roşca, M., Hlihor, R. M., Cozma, P., Simion, I. M., Apostol, M., & Gavrilăscu, M. (2021). Sustainable application of biosorption and bioaccumulation of persistent pollutants in wastewater treatment: Current practice. *Processes*, 9(10). doi: 10.3390/pr9101696
- Foglia, A., Andreola, C., Cipolletta, G., Radini, S., Akyol, Ç., Eusebi, A. L., Stanchev, P., Katsou, E., & Fatone, F. (2021). Comparative life cycle environmental and economic assessment of anaerobic membrane bioreactor and disinfection for reclaimed water reuse in agricultural irrigation: A case study in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 293. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126201
- Fuchs, V. J., Mihelcic, J. R., & Gierke, J. S. (2011). Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. *Water Research*, 45(5), 2073–2081. doi: 10.1016/j.watres.2010.12.021
- Gabinete Municipal. (2020). *Plan de desarrollo municipal de Cúcuta 2020 - 2023 “Cúcuta 2050, estrategia de todos.”* Retrieved from [https://cucutanortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/cucutanortedesantander/content/files/000748/37382\\_1--pdm-san-jose-de-cucuta-2020--2023-v1-30042020.pdf](https://cucutanortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/cucutanortedesantander/content/files/000748/37382_1--pdm-san-jose-de-cucuta-2020--2023-v1-30042020.pdf)
- Gahane, D., Biswal, D., & Mandavgane, S. A. (2022). Life Cycle Assessment of Biomass Pyrolysis. *Bioenergy Research*, 15(3), 1387–1406. doi: 10.1007/s12155-022-10390-9
- García-Montoya, M., Sengupta, D., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2016). Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- residential complex. *Journal of Cleaner Production*, 130, 82–91. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.109
- Garfí, M, Flores, L., & Ferrer, I. (2017). Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal of Cleaner Production*, 161, 211–219. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.116
- Garfí, Marianna, Flores, L., & Ferrer, I. (2017). Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal of Cleaner Production*, 161, 211–219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.116>
- Garrido-Baserba, M., Hospido, A., Reif, R., Molinos-Senante, M., Comas, J., & Poch, M. (2014). Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. *Environmental Modelling and Software*, 56, 74–82. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.11.008
- Giri, A., Khandayataray, P., Murthy, M. K., & Samal, D. (2021). Biochemical and molecular identification of lipolytic bacteria isolated from beverage industrial wastewater and optimization of lipase-secreting bacteria. *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi: 10.1007/s13399-021-01890-3
- Glover, C. J., Phillips, J. A., Marchand, E. A., & Hiibel, S. R. (2022). Modeling and Life Cycle Assessment of a Membrane Bioreactor–Membrane Distillation Wastewater Treatment System for Potable Reuse. *Separations*, 9(6). doi: 10.3390/separations9060151
- Gobernacion de Norte de Santander. (2020). *Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2020-2023 “MÁS OPORTUNIDADES PARA TODOS.”* Cúcuta: Gobernacion de Norte de Santander. Retrieved from [http://www.nortedesantander.gov.co/portals/0/PDD\\_NdS\\_2020-2023\\_Ordenanza\\_05-2020.pdf](http://www.nortedesantander.gov.co/portals/0/PDD_NdS_2020-2023_Ordenanza_05-2020.pdf)

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Grady, C. P. L., Daigger, G. T., Love, N. G., & Filipe, C. D. M. (2011). Classification of Biochemical Operations. In *Biological Wastewater Treatment* (p. 3,4). CRC Press. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=stjLBQAAQBAJ>
- Grisales, C. M., Salazar, L. M., & Garcia, D. P. (2019). Treatment of synthetic dye baths by Fenton processes: evaluation of their environmental footprint through life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(5), 4300–4311. doi: 10.1007/s11356-018-2757-9
- Gude, V. G. (2016). Wastewater treatment in microbial fuel cells - An overview. *Journal of Cleaner Production*, 122, 287–307. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.022
- Güereca, L. P., Musharrafie, A., Martínez, E., Hernández, F., Padilla, A., Romero-Casallas, L., Cisneros-Ortiz, M., Morgan-Sagastume, J. M., & Noyola, A. (2011). Life Cycle Inventory of the most representative municipal wastewater treatment technologies of Latin-America and the Caribbean. *IWRA World Water Congress 2011 Pernambuco Brazil*. Retrieved from <https://iwra.org/member/congress/resource/PAP00-6602.pdf>
- Guerra-Renteria, A. S., García-Ramírez, M. A., Gómez-Hermosillo, C., Gómez-Guzmán, A., González-García, Y., & González-Reynoso, O. (2019). Metabolic Pathway Analysis of Nitrogen and Phosphorus Uptake by the Consortium between *C. vulgaris* and *P. aeruginosa*. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8), 1978. doi: 10.3390/ijms20081978
- Guerrero, A. B., & Muñoz, E. (2018). Life cycle assessment of second generation ethanol derived from banana agricultural waste: Environmental impacts and energy balance. *Journal of Cleaner Production*, 174, 710–717. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.298
- Guo, J., Fan, X., Wang, J., Yu, S., Laipan, M., Ren, X., Zhang, C., Zhang, L., & Li, Y. (2021). Highly efficient and selective recovery of Au(III) from aqueous solution by bithiourea

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- immobilized UiO-66-NH<sub>2</sub>: Performance and mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 425. doi: 10.1016/j.cej.2021.130588
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., Stacke, T., Tessler, Z. D., Wada, Y., & Wisser, D. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3251 LP – 3256. doi: 10.1073/pnas.1222475110
- Halleux, H., Lassaux, S., & Germain, A. (2006). Comparison of life cycle assessment methods, application to a wastewater treatment plant. *Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2006*, 93–96. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85031951479&partnerID=40&md5=628df859c8527dc632c42ebfdef26d70>
- Harris, S., Tsalidis, G., Corbera, J. B., Espi Gallart, J. J., & Tegstedt, F. (2021). Application of LCA and LCC in the early stages of wastewater treatment design: A multiple case study of brine effluents. *Journal of Cleaner Production*, 307. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127298
- He, Z.-W., Jin, H.-Y., Ren, Y.-X., Yang, W.-J., Tang, C.-C., Yang, C.-X., Zhou, A.-J., Liu, W.-Z., & Wang, A.-J. (2021). Stepwise alkaline treatment coupled with ammonia stripping to enhance short-chain fatty acids production from waste activated sludge. *Bioresource Technology*, 341. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125824
- Hernández-García, A., Velásquez-Orta, S. B., Novelo, E., Yáñez-Noguez, I., Monje-Ramírez, I., & Orta Ledesma, M. T. (2019). Wastewater-leachate treatment by microalgae: Biomass, carbohydrate and lipid production. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 435–444. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.02.052

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Herrera, A., D'Imporzano, G., Acién Fernandez, F. G., & Adani, F. (2021). Sustainable production of microalgae in raceways: Nutrients and water management as key factors influencing environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 287. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125005
- Hou, D., Gu, Q., Ma, F., & O'Connell, S. (2016). Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land. *Journal of Cleaner Production*, 139, 949–956. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.108
- Houillon, G., & Jolliet, O. (2005). Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: Energy and global warming analysis. *Journal of Cleaner Production*, 13(3), 287–299. doi: 10.1016/j.jclepro.2004.02.022
- Hu, Y., Cai, X., Xue, Y., Du, R., Ji, J., Chen, R., Sano, D., & Li, Y.-Y. (2022). Recent developments of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment and bioenergy recovery: Focusing on novel configurations and energy balance analysis. *Journal of Cleaner Production*, 356. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131856
- Hu, Z., Qi, Y., Zhao, L., & Chen, G. (2019). Interactions Between Microalgae and Microorganisms for Wastewater Remediation and Biofuel Production. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3907–3919. doi: 10.1007/s12649-018-0325-7
- Huang, X., Bai, S., Liu, Z., Hasunuma, T., Kondo, A., & Ho, S.-H. (2020). Fermentation of pigment-extracted microalgal residue using yeast cell-surface display: Direct high-density ethanol production with competitive life cycle impacts. *Green Chemistry*, 22(1), 153–162. doi: 10.1039/c9gc02634g

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Ida, S., & Eva, T. (2021). Removal of heavy metals during primary treatment of municipal wastewater and possibilities of enhanced removal: A review. *Water (Switzerland)*, *13*(8). doi: 10.3390/w13081121
- IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. In *Ipcc - Sr15* (Vol. 2, Issue October). Retrieved from [www.environmentalgraphiti.org](http://www.environmentalgraphiti.org)
- Iribarren, D., Peters, J. F., & Dufour, J. (2012). Life cycle assessment of transportation fuels from biomass pyrolysis. *Fuel*, *97*, 812–821. doi: 10.1016/j.fuel.2012.02.053
- Iribarren, D., Susmozas, A., Petrakopoulou, F., & Dufour, J. (2014). Environmental and exergetic evaluation of hydrogen production via lignocellulosic biomass gasification. *Journal of Cleaner Production*, *69*, 165–175. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.068
- Jeong, H., Broesicke, O. A., Drew, B., & Crittenden, J. C. (2018). Life cycle assessment of small-scale greywater reclamation systems combined with conventional centralized water systems for the City of Atlanta, Georgia. *Journal of Cleaner Production*, *174*, 333–342. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.193
- Karpisek, V., Hasnine, M. D. T., Cicek, N., & Yuan, Q. (2021). Natural wetlands contribution on phosphorus removal in small northern communities in Canada. *Environmental Technology (United Kingdom)*. doi: 10.1080/09593330.2021.1965221
- Kholssi, R., Ramos, P. v, Marks, E. A. N., Montero, O., & Rad, C. (2021). Biotechnological uses of microalgae: A review on the state of the art and challenges for the circular economy. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *36*. doi: 10.1016/j.bcab.2021.102114

## **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

Kravtsova, M. v, Volkov, D. A., Melnikova, D. A., Kravtsov, M. v, & Guschina, T. P. (2021).

Investigation of sewage sludge for the purpose of their secondary use as agricultural fertilizer.

*IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677(5), 052029. doi:

10.1088/1755-1315/677/5/052029

Krzeminski, P., Leverette, L., Malamis, S., & Katsou, E. (2017). Membrane bioreactors – A review

on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and

market prospects. *Journal of Membrane Science*, 527, 207–227. doi:

10.1016/j.memsci.2016.12.010

Kumar, A. (2021). Current and Future Perspective of Microalgae for Simultaneous Wastewater

Treatment and Feedstock for Biofuels Production. *Chemistry Africa*, 4(2), 249–275. doi:

10.1007/s42250-020-00221-9

Kumar, M., Kuroda, K., Joshi, M., Bhattacharya, P., & Barcelo, D. (2021). First comparison of

conventional activated sludge versus root-zone treatment for SARS-CoV-2 RNA removal

from wastewaters: Statistical and temporal significance. *Chemical Engineering Journal*, 425.

doi: 10.1016/j.cej.2021.130635

Lanko, I., Flores, L., Garfí, M., Todt, V., Posada, J. A., Jenicek, P., & Ferrer, I. (2020). Life cycle

assessment of the mesophilic, thermophilic, and temperature-phased anaerobic digestion of

sewage sludge. *Water (Switzerland)*, 12(11), 1–20. doi: 10.3390/w12113140

Lee, M., Lin, Y.-L., Chiueh, P.-T., & Den, W. (2020). Environmental and energy assessment of

biomass residues to biochar as fuel: A brief review with recommendations for future

bioenergy systems. *Journal of Cleaner Production*, 251. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119714

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Lemos, D., Dias, A. C., Gabarrell, X., & Arroja, L. (2013). Environmental assessment of an urban water system. *Journal of Cleaner Production*, 54, 157–165. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.029
- Leng, L., Zhang, W., Leng, S., Chen, J., Yang, L., Li, H., Jiang, S., & Huang, H. (2020). Bioenergy recovery from wastewater produced by hydrothermal processing biomass: Progress, challenges, and opportunities. *Science of the Total Environment*, 748. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142383
- Li, H., Jin, C., & Mundree, S. (2017). Hybrid environmental and economic assessment of four approaches recovering energy from sludge with variant organic contents. *Journal of Cleaner Production*, 153, 131–138. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.167
- Li, P., Miao, R., Wang, P., Sun, F., & Li, X.-Y. (2021). Bi-metal oxide-modified flat-sheet ceramic membranes for catalytic ozonation of organic pollutants in wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 426. doi: 10.1016/j.cej.2021.131263
- Li, Peiyao, Yuan, X., & Luo, Y. (2020). Life Cycle Assessment for Carbon Balance of a Wastewater Treatment Integrated Microalgae Biofuel Production Process. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 48, pp. 1699–1704). doi: 10.1016/B978-0-12-823377-1.50284-6
- Li, S., Zhao, S., Yan, S., Qiu, Y., Song, C., Li, Y., & Kitamura, Y. (2019). Food processing wastewater purification by microalgae cultivation associated with high value-added compounds production — A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(12), 2845–2856. doi: 10.1016/j.cjche.2019.03.028

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Li, Y., Luo, X., Huang, X., Wang, D., & Zhang, W. (2013). Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: A case study in Suzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 57, 221–227. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.05.035
- Li, Y., Xu, Z., Ma, H., & Hursthouse, A. S. (2019). Removal of Manganese(II) from acid mine wastewater: A review of the challenges and opportunities with special emphasis on manganese-oxidizing bacteria and microalgae. *Water (Switzerland)*, 11(12). doi: 10.3390/w11122493
- Lishan, X., Tao, L., Yin, W., Zhilong, Y., & Jiangfu, L. (2018). Comparative life cycle assessment of sludge management: A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*, 192, 354–363. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.171
- Liu, T., Wang, Y., Zeng, Y., Li, J., Yu, Q., Wang, X., Gao, D., Wang, F., & Cai, S. (2021). Effects from Fe, P, Ca, Mg, Zn and Cu in steel slag on growth and metabolite accumulation of microalgae: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). doi: 10.3390/app11146589
- Liu, W., Jordan, C. M., Cherubini, F., Hu, X., & Fu, D. (2021). Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: A case study in Kunshan, China. *Journal of Cleaner Production*, 287. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125046
- Liu, Y., Lyu, Y., Tian, J., Zhao, J., Ye, N., Zhang, Y., & Chen, L. (2021). Review of waste biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110716. doi: 10.1016/j.rser.2021.110716
- Loh, W. H., Cai, Q. Q., Li, R., Jothinathan, L., Lee, B. C. Y., Ng, O. H., Guo, J., Ong, S. L., & Hu, J. Y. (2021). Reverse osmosis concentrate treatment by microbubble ozonation-biological activated carbon process: Organics removal performance and environmental

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOUPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

impact assessment. *Science of the Total Environment*, 798. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149289

Long, S., Zhao, L., Shi, T., Li, J., Yang, J., Liu, H., Mao, G., Qiao, Z., & Yang, Y. (2018). Pollution control and cost analysis of wastewater treatment at industrial parks in Taihu and Haihe water basins, China. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2435–2442. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.167

Longo, S., D'Antoni, B. M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J. M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., & Hospido, A. (2016). Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied Energy*, 179, 1251–1268. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.043

López-Maldonado, E. A., & Oropeza-Guzmán, M. T. (2021). Nejayote biopolyelectrolytes multifunctionality (glucurono ferulauted arabinoxylans) in the separation of hazardous metal ions from industrial wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 423. doi: 10.1016/j.cej.2021.130210

Lopsik, K. (2013a). Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(6), 1295–1308. doi: 10.1007/s13762-012-0159-y

Lopsik, K. (2013b). Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(6), 1295–1308. doi: 10.1007/s13762-012-0159-y

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Chenel, S., Marín-Navarro, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2015). Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA + DEA method. *Water Research*, 68, 651–666. doi: 10.1016/j.watres.2014.10.040
- Lu, B., Du, X., & Huang, S. (2017). The economic and environmental implications of wastewater management policy in China: From the LCA perspective. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3544–3557. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.113
- Machado, A. P., Urbano, L., Brito, A. G., Janknecht, P., Salas, J. J., & Nogueira, R. (2007). Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities. In *Water Science and Technology* (Vol. 56, Issue 3, pp. 15–22). University of Minho, Institute of Biotechnology and Bioengineering, Centre of Biological Engineering, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal. doi: 10.2166/wst.2007.497
- Maga, D. (2017). Life cycle assessment of biomethane produced from microalgae grown in municipal waste water. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7(1), 1–10. doi: 10.1007/s13399-016-0208-8
- Magalhães, I. B., Ferreira, J., de Siqueira Castro, J., Assis, L. R. de, & Calijuri, M. L. (2021a). Technologies for improving microalgae biomass production coupled to effluent treatment: A life cycle approach. *Algal Research*, 57, 102346. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102346>
- Magalhães, I. B., Ferreira, J., de Siqueira Castro, J., Assis, L. R. de, & Calijuri, M. L. (2021b). Technologies for improving microalgae biomass production coupled to effluent treatment: A life cycle approach. *Algal Research*, 57, 102346. doi: 10.1016/j.algal.2021.102346
- Makut, B. B., Das, D., & Goswami, G. (2019). Production of microbial biomass feedstock via co-cultivation of microalgae-bacteria consortium coupled with effective wastewater treatment:

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- A sustainable approach. *Algal Research*, 37, 228–239. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.11.020>
- Marangon, B. B., Calijuri, M. L., Castro, J. D. S., & Assemany, P. P. (2021). A life cycle assessment of energy recovery using briquette from wastewater grown microalgae biomass. *Journal of Environmental Management*, 285. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112171
- Martínez, N. M., Basallote, M. D., Meyer, A., Cánovas, C. R., Macías, F., & Schneider, P. (2019). Life cycle assessment of a passive remediation system for acid mine drainage: Towards more sustainable mining activity. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1100–1111. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.224
- Masinire, F., Adenuga, D. O., Tichapondwa, S. M., & Chirwa, E. M. N. (2021). Phytoremediation of Cr(VI) in wastewater using the vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*). *Minerals Engineering*, 172. doi: 10.1016/j.mineng.2021.107141
- Maurer, M., Schwegler, P., & Larsen, T. A. (2003). Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology*, 48(1), 37–46. doi: 10.2166/wst.2003.0011
- Medina-Martos, E., Istrate, I.-R., Villamil, J. A., Gálvez-Martos, J.-L., Dufour, J., & Mohedano, Á. F. (2020). Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 277. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122930
- Meneses, M., Concepción, H., Vrecko, D., & Vilanova, R. (2015). Life Cycle Assessment as an environmental evaluation tool for control strategies in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 107, 653–661. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.057

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

Meneses-Jácome, A., Diaz-Chavez, R., Velásquez-Arredondo, H. I., Cárdenas-Chávez, D. L.,

Parra, R., & Ruiz-Colorado, A. A. (2016). Sustainable Energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1249–1262.

doi: 10.1016/j.rser.2015.12.036

Meneses-Jácome, A., & Ruiz-Colorado, A. (2020). Eco-lca of biological wastewater treatments

focused on energy recovery. In *Advances in Science, Technology and Innovation* (pp. 349–352). Grupo de Investigación en Bioprocesos y Flujos Reactivos, Universidad Nacional de Colombia—Sede Medellín, Carrera 80 No. 65-223, Núcleo Robledo, Medellín, Colombia.

doi: 10.1007/978-3-030-13068-8\_87

Miguel, S. P., Ribeiro, M. P., Otero, A., & Coutinho, P. (2021). Application of microalgae and

microalgal bioactive compounds in skin regeneration. *Algal Research*, 58. doi:

10.1016/j.algal.2021.102395

Miller-Robbie, L., Ulrich, B. A., Ramey, D. F., Spencer, K. S., Herzog, S. P., Cath, T. Y., Stokes,

J. R., & Higgins, C. P. (2015). Life cycle energy and greenhouse gas assessment of the co-production of biosolids and biochar for land application. *Journal of Cleaner Production*, 91,

118–127. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.050

Mogens Henze, & Yves Comeau. (2008). Wastewater Characterization. In *Biological Wastewater*

Treatment (pp. 33, 34).

Mohamad, N. A., Hamzah, S., Che Harun, M. H., Ali, A., Rasit, N., Awang, M., Rahman, W. R.

W. A., Azmi, A. A. A. R., Abu Habib, A. A., Amri Zahid, M. S., Fahmi Mustofa, A. A., Latfi, S. A., Aripin, S. M., & Saad, R. (2021). Integration of copperas and calcium hydroxide as a chemical coagulant and coagulant aid for efficient treatment of palm oil mill effluent.

*Chemosphere*, 281. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130873

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Mohammad Mirsoleimani Azizi, S., Dastyar, W., Meshref, M. N. A., Maal-Bared, R., & Ranjan Dhar, B. (2021). Low-temperature thermal hydrolysis for anaerobic digestion facility in wastewater treatment plant with primary sludge fermentation. *Chemical Engineering Journal*, 426. doi: 10.1016/j.cej.2021.130485
- Mondal, S., Das, S., & Gautam, U. K. (2021). Defect-rich, negatively-charged SnS<sub>2</sub> nanosheets for efficient photocatalytic Cr(VI) reduction and organic dye adsorption in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 603, 110–119. doi: 10.1016/j.jcis.2021.06.092
- Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M. M., & Comas, J. (2016). Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741–4748. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.102
- Morera, S., Santana, M. V. E., Comas, J., Rigola, M., & Corominas, L. (2020). Evaluation of different practices to estimate construction inventories for life cycle assessment of small to medium wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 245. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118768
- Mujtaba, G., & Lee, K. (2016). Advanced Treatment of Wastewater Using Symbiotic Co-culture of Microalgae and Bacteria. *Applied Chemistry for Engineering*, 27(1), 1–9. doi: 10.14478/ace.2016.1002
- Mulder, A. (2003). The quest for sustainable nitrogen removal technologies. *Water Science and Technology*, 48(1), 67–75. doi: 10.2166/wst.2003.0018
- Muñoz, I., Rieradevall, J., Torrades, F., Peral, J., & Domènech, X. (2005). Environmental assessment of different solar driven advanced oxidation processes. *Solar Energy*, 79(4), 369–375. doi: 10.1016/j.solener.2005.02.014

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Muralikrishna, I. v, & Manickam, V. (2017). *Chapter Five - Life Cycle Assessment* (I. v Muralikrishna & V. B. T.-E. M. Manickam, Eds.; pp. 57–75). Butterworth-Heinemann. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>
- Musa, M. A., & Idrus, S. (2021). Physical and biological treatment technologies of slaughterhouse wastewater: A review. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(9). doi: 10.3390/su13094656
- Muthumanickam, K., & Saravanathamizhan, R. (2021). Electrochemical treatment of dye wastewater using nickel foam electrode. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, *11*(3), 209–215. doi: 10.5599/jese.1011
- Nakhate, P. H., Moradiya, K. K., Patil, H. G., Marathe, K. V, & Yadav, G. D. (2020). Case study on sustainability of textile wastewater treatment plant based on lifecycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, *245*. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118929
- Narodoslawsky, M., & Krotscheck, C. (2000). Integrated ecological optimization of processes with the sustainable process index. *Waste Management*, *20*(8), 599–603. doi: 10.1016/S0956-053X(00)00044-1
- Naseem, S., Wu, C.-M., & Motora, K. G. (2021). Novel multifunctional RbxWO<sub>3</sub>@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> immobilized Janus membranes for desalination and synergic-photocatalytic water purification. *Desalination*, *517*. doi: 10.1016/j.desal.2021.115256
- Normalització, O. I. per a la, & Normalisatie-Instituut, N. (2006). *International Standard ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment- Principles and Framework (ISO 14040:2006, IDT)*. Nederlands Normalisatie-Instituut. Retrieved from [https://books.google.com.co/books?id=C\\_xSygEACAAJ](https://books.google.com.co/books?id=C_xSygEACAAJ)
- Nowrouzi, M., & Abyar, H. (2021). A framework for the design and optimization of integrated fixed-film activated sludge-membrane bioreactor configuration by focusing on cost-coupled

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 296. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126557
- Nugroho, A. P., Butar, E. S. B., Priantoro, E. A., Sriwuryandari, L., Pratiwi, Z. B., & Sembiring, T. (2021). Phytoremediation of electroplating wastewater by vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.). *Scientific Reports*, 11(1). doi: 10.1038/s41598-021-93923-0
- Oliveira, A. C., Barata, A., Batista, A. P., & Gouveia, L. (2019). *Scenedesmus obliquus* in poultry wastewater bioremediation. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 40(28), 3735–3744. doi: 10.1080/09593330.2018.1488003
- Omidinia-Anarkoli, T., & Shayannejad, M. (2021). Improving the quality of stabilization pond effluents using hybrid constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 801. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149615
- Ortiz, A., García-Galán, M. J., García, J., & Díez-Montero, R. (2021). Optimization and operation of a demonstrative full scale microalgae harvesting unit based on coagulation, flocculation and sedimentation. *Separation and Purification Technology*, 259. doi: 10.1016/j.seppur.2020.118171
- Ortiz, M., Raluy, R. G., & Serra, L. (2007). Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town. *Desalination*, 204(1-3 SPEC. ISS.), 121–131. doi: 10.1016/j.desal.2006.04.026
- Ownby, M., Desrosiers, D.-A., & Vaneckhaute, C. (2021). Phosphorus removal and recovery from wastewater via hybrid ion exchange nanotechnology: a study on sustainable regeneration chemistries. *Npj Clean Water*, 4(1). doi: 10.1038/s41545-020-00097-9
- Owsianiak, M., Ryberg, M. W., Renz, M., Hitzl, M., & Hauschild, M. Z. (2016). Environmental Performance of Hydrothermal Carbonization of Four Wet Biomass Waste Streams at

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

Industry-Relevant Scales. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(12), 6783–6791.

doi: 10.1021/acssuschemeng.6b01732

Padrón Páez, J. I., Carvalho, A., Prado-Rubio, O. A., & Román-Martínez, A. (2017). Assessment of sustainable wastewater treatment networks design applying LCA. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 40, pp. 2707–2712). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, Av. Dr. Manuel Nava No. 6, Zona Universitaria, San Luis Potosí, S.L.P. 78210, Mexico. doi: 10.1016/B978-0-444-63965-3.50453-0

Papa, M., Alfonsín, C., Moreira, M. T., & Bertanza, G. (2016). Ranking wastewater treatment trains based on their impacts and benefits on human health: A “biological Assay and Disease” approach. *Journal of Cleaner Production*, 113, 311–317. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.021

Pereira, L. G., Cavalett, O., Bonomi, A., Zhang, Y., Warner, E., & Chum, H. L. (2019). Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 1–12. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.043

Pesqueira, J. F. J. R., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2020). Environmental impact assessment of advanced urban wastewater treatment technologies for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern: A review. *Journal of Cleaner Production*, 261. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121078

Pillay, S. D., Friedrich, E., & Buckley, C. A. (2002). Life cycle assessment of an industrial water recycling plant. *Water Science and Technology*, 46(9), 55–62. doi: 10.2166/wst.2002.0204

Plöhn, M., Escudero-Oñate, C., & Funk, C. (2021). Biosorption of Cd(II) by Nordic microalgae: Tolerance, kinetics and equilibrium studies. *Algal Research*, 59. doi: 10.1016/j.algal.2021.102471

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Porto, B., Gonçalves, A. L., Esteves, A. F., de Souza, S. M. A. G. U., de Souza, A. A. U., Vilar, V. J. P., & Pires, J. C. M. (2021). Assessing the potential of microalgae for nutrients removal from a landfill leachate using an innovative tubular photobioreactor. *Chemical Engineering Journal*, 413. doi: 10.1016/j.cej.2020.127546
- Posadas, E., Muñoz, A., García-González, M.-C., Muñoz, R., & García-Encina, P. A. (2015). A case study of a pilot high rate algal pond for the treatment of fish farm and domestic wastewaters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 90(6), 1094–1101. doi: 10.1002/jctb.4417
- Prateep Na Talang, R., Sirivithayapakorn, S., & Polruang, S. (2020). Environmental impacts and cost-effectiveness of Thailand's centralized municipal wastewater treatment plants with different nutrient removal processes. *Journal of Cleaner Production*, 256. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120433
- pre-sustainability. (n.d.). *ReCiPe*. Retrieved from <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>
- Pretel, R., Robles, A., Ruano, M. v, Seco, A., & Ferrer, J. (2016). Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 166, 45–54. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.10.004
- Puettmann, M., Sahoo, K., Wilson, K., & Oneil, E. (2020). Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems. *Journal of Cleaner Production*, 250. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119564
- Rachidi, F., Benhima, R., Kasmi, Y., Sbabou, L., & Arroussi, H. E. (2021). Evaluation of microalgae polysaccharides as biostimulants of tomato plant defense using metabolomics and biochemical approaches. *Scientific Reports*, 11(1). doi: 10.1038/s41598-020-78820-2

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Raghuvanshi, S., Bhakar, V., Chava, R., & Sangwan, K. S. (2018). Comparative Study Using Life Cycle Approach for the Biodiesel Production from Microalgae Grown in Wastewater and Fresh Water. *Procedia CIRP*, 69, 568–572. doi: 10.1016/j.procir.2017.11.030
- Rebello, T. A., Gonçalves, R. F., & Calmon, J. L. (2021). Mitigation of environmental impacts in warm-weather wastewater treatment plants using the life cycle assessment tool. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi: 10.1007/s13762-021-03430-y
- Rebitzer, G., Hunkeler, D., & Jolliet, O. (2003). LCC - The Economic Pillar of Sustainability: Methodology and Application to Wastewater Treatment. *Environmental Progress*, 22(4), 241–249. doi: 10.1002/ep.670220412
- Ripa, M., Fiorentino, G., Giani, H., Clausen, A., & Ulgiati, S. (2017). Refuse recovered biomass fuel from municipal solid waste. A life cycle assessment. *Applied Energy*, 186, 211–225. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.058
- Rodríguez, R., Espada, J. J., Pariente, M. I., Melero, J. A., Martínez, F., & Molina, R. (2016). Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogeneous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 124, 21–29. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.064
- Rodríguez-García, G., Hospido, A., Bagley, D. M., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2012). A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, 37–46. doi: 10.1016/j.eiar.2012.06.010
- Roostaei, J., & Zhang, Y. (2017). Spatially Explicit Life Cycle Assessment: Opportunities and challenges of wastewater-based algal biofuels in the United States. *Algal Research*, 24, 395–402. doi: 10.1016/j.algal.2016.08.008

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

Saadaoui, I., Rasheed, R., Aguilar, A., Cherif, M., al Jabri, H., Sayadi, S., & Manning, S. R. (2021).

Microalgal-based feed: promising alternative feedstocks for livestock and poultry production.

*Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12(1). doi: 10.1186/s40104-021-00593-z

Said, N. S. M., Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Ismail, N.

(2021). Competence of *Lepironia articulata* in eradicating chemical oxygen demand and ammoniacal nitrogen in coffee processing mill effluent and its potential as green straw.

*Science of the Total Environment*, 799. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149315

Saidulu, D., Majumder, A., & Gupta, A. K. (2021). A systematic review of moving bed biofilm

reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: Comparison of research trends, removal mechanisms, and performance. *Journal*

*of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). doi: 10.1016/j.jece.2021.106112

Salgot, M. (2008). Water reclamation, recycling and reuse: implementation issues. *Desalination*,

218(1–3), 190–197. doi: 10.1016/j.desal.2006.09.035

Sandoval, M. A., & Salazar, R. (2021). Electrochemical treatment of slaughterhouse and dairy

wastewater: Toward making a sustainable process. *Current Opinion in Electrochemistry*, 26.

doi: 10.1016/j.coelec.2020.100662

Santiago, D. E., Hernández Rodríguez, M. J., & Pulido-Melián, E. (2021). Laundry Wastewater

Treatment: Review and Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Engineering*

*(United States)*, 147(10). doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001902

Santos, I. F. S. dos, Barros, R. M., & Tiago Filho, G. L. (2016). Electricity generation from biogas

of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential.

*Journal of Cleaner Production*, 126, 504–514. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.072

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Sarkar, O., Katakojwala, R., & Venkata Mohan, S. (2021). Low carbon hydrogen production from a waste-based biorefinery system and environmental sustainability assessment. *Green Chemistry*, 23(1), 561–574. doi: 10.1039/d0gc03063e
- Satayavibul, A., & Ratanatamskul, C. (2021). Life Cycle Assessment of a Novel Zero Organic-Waste Model Using the Integrated Anaerobic Digester and Oxidation-Ditch Membrane Bioreactor for High-rise Building Application. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5425–5436. doi: 10.1007/s12649-021-01418-w
- Savla, N., Suman, Pandit, S., Verma, J. P., Awasthi, A. K., Sana, S. S., & Prasad, R. (2021). Techno-economical evaluation and life cycle assessment of microbial electrochemical systems: A review. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4. doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100111
- Sbardella, L., Gala, I. v, Comas, J., Carbonell, S. M., Rodríguez-Roda, I., & Gernjak, W. (2020). Integrated assessment of sulfate-based AOPs for pharmaceutical active compound removal from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 260. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121014
- Siahbalaei, R., Kavooosi, G., & Noroozi, M. (2021). Protein nutritional quality, amino acid profile, anti-amylase and anti-glucosidase properties of microalgae: Inhibition and mechanisms of action through in vitro and in silico studies. *LWT*, 150. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112023
- Silva, M. E. T. D., Leal, M. A., Resende, M. D. O., Martins, M. A., & Coimbra, J. S. D. R. (2021). *Scenedesmus obliquus* protein concentrate: A sustainable alternative emulsifier for the food industry. *Algal Research*, 59. doi: 10.1016/j.algal.2021.102468
- Singh, S. P., Pandey, A., Sharma, R., & Sharma, M. K. (2019). Life cycle assessment on membrane bio-reactor and activated sludge systems. *Indian Journal of Environmental Protection*, 39(11), 989–994.

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Sivaramakrishnan, R., & Incharoensakdi, A. (2021). Higher efficiency of microalgal biorefinery is achieved with integrated than one-way method. *Fuel*, *300*. doi: 10.1016/j.fuel.2021.120988
- Sodhi, V., Singh, C., Pal Singh Cheema, P., Sharma, R., Bansal, A., & Kumar Jha, M. (2021). Simultaneous sludge minimization, pollutant and nitrogen removal using integrated MBBR configuration for tannery wastewater treatment. *Bioresource Technology*, *341*. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125748
- Song, P., Huang, G., An, C., Zhang, P., Chen, X., & Ren, S. (2019). Performance analysis and life cycle greenhouse gas emission assessment of an integrated gravitational-flow wastewater treatment system for rural areas. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(25), 25883–25897. doi: 10.1007/s11356-019-05746-2
- Sricharoen, P., Kongsri, S., Kukusamude, C., Areerob, Y., Nuengmatcha, P., Chanthai, S., & Limchoowong, N. (2021). Ultrasound-irradiated synthesis of 3-mercaptopropyl trimethoxysilane-modified hydroxyapatite derived from fish-scale residues followed by ultrasound-assisted organic dyes removal. *Scientific Reports*, *11*(1). doi: 10.1038/s41598-021-85206-5
- Stanchev, P., Vasilaki, V., Egas, D., Colon, J., Ponsá, S., & Katsou, E. (2020). Multilevel environmental assessment of the anaerobic treatment of dairy processing effluents in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *261*. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121139
- Su, Y., & Jacobsen, C. (2021). Treatment of clean in place (CIP) wastewater using microalgae: Nutrient upcycling and value-added byproducts production. *Science of the Total Environment*, *785*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147337

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Su, Yanyan. (2021). Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 762, 144590. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144590
- Suárez Quintana, W. H., García-Rico, R. O., García-Martínez, J. B., Urbina-Suarez, N. A., López-Barrera, G. L., Barajas-Solano, A. F., & Zuorro, A. (2022). Enhancement of Metabolite Production in High-Altitude Microalgal Strains by Optimized C/N/P Ratio. *Applied Sciences*, 12(13), 6779. doi: 10.3390/app12136779
- Suhartini, S., Lestari, Y. P., & Nurika, I. (2019). Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 230, 012075. doi: 10.1088/1755-1315/230/1/012075
- Sun, X., Huang, H., Zhu, Y., Du, Y., Yao, L., Jiang, X., & Gao, P. (2019). Adsorption of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> onto *Spirulina platensis* harvested by polyacrylamide in single and binary solution systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 583. doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.123926
- Tangsubkul, N., Beavis, P., Moore, S. J., Lundie, S., & Waite, T. D. (2005). Life cycle assessment of water recycling technology. *Water Resources Management*, 19(5), 521–537. doi: 10.1007/s11269-005-5602-0
- Tasneem, A., Sarker, P., Akter, S., Mouna, S. S. P., Rahaman, M. S., Mohinuzzaman, M., Uddin, M. K., & Kabir, M. M. (2021). Textile wastewater treatment by combination of chemical and phytoremediation processes. *Pollution*, 7(1), 43–54. doi: 10.22059/poll.2020.304569.835
- Tatiana, F., Paula, P., Vivian, B., Rigoberto, P., Jannet, O., & Paola, A. (2016). Life cycle assessment to identify environmental improvements in an aerobic waste water treatment plant. *Chemical Engineering Transactions*, 49, 493–498. doi: 10.3303/CET1649083

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLADO DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Tauber, J., Parravicini, V., Svardal, K., & Krampe, J. (2019). Quantifying methane emissions from anaerobic digesters. *Water Science and Technology*, 80(9), 1654–1661. doi: 10.2166/wst.2019.415
- Teow, Y. H., Chong, M. T., Ho, K. C., & Mohammad, A. W. (2021). Comparative environmental impact evaluation using life cycle assessment approach: a case study of integrated membrane-filtration system for the treatment of aerobically-digested palm oil mill effluent. *Sustainable Environment Research*, 31(1). doi: 10.1186/s42834-021-00089-5
- Tetteh, E. K., Rathilal, S., Asante-Sackey, D., & Chollom, M. N. (2021). Prospects of synthesized magnetic tio<sub>2</sub>-based membranes for wastewater treatment: A review. *Materials*, 14(13). doi: 10.3390/ma14133524
- Theregowda, R., Vidic, R., Dzombak, D. A., & Landis, A. E. (2015). Life cycle impact analysis of tertiary treatment alternatives to treat secondary municipal wastewater for reuse in cooling systems. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 34(1), 178–187. doi: 10.1002/ep.11938
- Thielemann, A. K., Smetana, S., & Pleissner, D. (2021). Life cycle assessment of hetero- and phototrophic as well as combined cultivations of *Galdieria sulphuraria*. *Bioresource Technology*, 335. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125227
- Tilche, A., & Galatola, M. (2008). The potential of bio-methane as bio-fuel/bio-energy for reducing greenhouse gas emissions: a qualitative assessment for Europe in a life cycle perspective. *Water Science and Technology*, 57(11), 1683–1692. doi: 10.2166/wst.2008.039
- Tseng, C.-C., Yeh, H.-Y., Liao, Z.-H., Hung, S.-W., Chen, B., Lee, P.-T., Nan, F.-H., Shih, W.-L., Chang, C.-C., & Lee, M.-C. (2021). An in vitro study shows the potential of *Nostoc*

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- commune (Cyanobacteria) polysaccharides extract for wound-healing and anti-allergic use in the cosmetics industry. *Journal of Functional Foods*, 87. doi: 10.1016/j.jff.2021.104754
- Tua, C., Ficara, E., Mezzanotte, V., & Rigamonti, L. (2021). Integration of a side-stream microalgae process into a municipal wastewater treatment plant: A life cycle analysis. *Journal of Environmental Management*, 279. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111605
- Viegas, C., Nobre, C., Mota, A., Vilarinho, C., Gouveia, L., & Gonçalves, M. (2021). A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3). doi: 10.1016/j.jece.2021.105187
- Wang, Q.-L., Li, W., Gao, X., & Li, S.-J. (2016). Life cycle assessment on biogas production from straw and its sensitivity analysis. *Bioresource Technology*, 201, 208–214. doi: 10.1016/j.biortech.2015.11.025
- Wang, Z., Dunn, J. B., Han, J., & Wang, M. Q. (2014). Effects of co-produced biochar on life cycle greenhouse gas emissions of pyrolysis-derived renewable fuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(2), 189–204. doi: 10.1002/bbb.1447
- Watson, J., Wang, T., Si, B., Chen, W.-T., Aierzhati, A., & Zhang, Y. (2020). Valorization of hydrothermal liquefaction aqueous phase: pathways towards commercial viability. *Progress in Energy and Combustion Science*, 77. doi: 10.1016/j.pecs.2019.100819
- Wei, J., Hao, X., van Loosdrecht, M. C. M., & Li, J. (2018). Feasibility analysis of anaerobic digestion of excess sludge enhanced by iron: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 16–26. doi: 10.1016/j.rser.2018.02.042
- Wenzel, H., Larsen, H. F., Clauson-Kaas, J., Høiby, L., & Jacobsen, B. N. (2008). Weighing environmental advantages and disadvantages of advanced wastewater treatment of micro-

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLE DE CULTIVO DE MICROALGAS

- pollutants using environmental life cycle assessment. In *Water Science and Technology* (Vol. 57, Issue 1, pp. 27–32). University of Southern Denmark, DK-5230 Odense, Denmark. doi: 10.2166/wst.2008.819
- Wu, W., Cheng, L.-C., & Chang, J.-S. (2020). Environmental life cycle comparisons of pig farming integrated with anaerobic digestion and algae-based wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 264. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110512
- Xu, X., Liu, G.-H., Li, Q., Wang, H., Sun, X., Shao, Y., Zhang, J., Liu, S., Luo, F., Wei, Q., Sun, W., Li, Y., & Qi, L. (2021). Optimization nutrient removal at different volume ratio of anoxic-to-aerobic zone in integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system. *Science of the Total Environment*, 795. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148824
- Xue, X., Hawkins, T. R., Schoen, M. E., Garland, J., & Ashbolt, N. J. (2016). Comparing the life cycle energy consumption, globalwarming and eutrophication potentials of several water and waste service options. *Water (Switzerland)*, 8(4). doi: 10.3390/w8040154
- Yang, J., Hou, Z., Chen, Z., Ma, Z., Li, S., Wang, Y., Gao, J., & Cui, P. (2021). Comprehensive analysis of diverse biochemical treatment technologies of fixed-bed coal gasification wastewater from the perspective of different weight dimensions. *Separation and Purification Technology*, 257. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117889
- Yang, Y., & Tilman, D. (2020). Soil and root carbon storage is key to climate benefits of bioenergy crops. *Biofuel Research Journal*, 7(2), 1143–1148. doi: 10.18331/BRJ2020.7.2.2
- Yildirim, M., & Topkaya, B. (2012). Assessing environmental impacts of wastewater treatment alternatives for small-scale communities. *Clean - Soil, Air, Water*, 40(2), 171–178. doi: 10.1002/clen.201000423

## ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS

- Yıldırım, M., & Topkaya, B. (2012). Assessing Environmental Impacts of Wastewater Treatment Alternatives for Small-Scale Communities. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40(2), 171–178. doi: 10.1002/clen.201000423
- Yrjälä, K., Ramakrishnan, M., & Salo, E. (2022). Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 26. doi: 10.1016/j.coesh.2022.100339
- Zang, Y., Li, Y., Wang, C., Zhang, W., & Xiong, W. (2015). Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 107, 676–692. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.060
- Zhang, C., Wang, A., Jia, J., Zhao, L., & Song, W. (2017). Effect of Parameters on Anaerobic Digestion EGSB Reactor for Producing Biogas. *Procedia Engineering*, 205, 3749–3754. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.325
- Zhang, X., & Liu, Y. (2021). Concurrent removal of Cu(II), Co(II) and Ni(II) from wastewater by nanostructured layered sodium vanadosilicate: Competitive adsorption kinetics and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). doi: 10.1016/j.jece.2021.105945
- Zhao, C., Zhou, J., Yan, Y., Yang, L., Xing, G., Li, H., Wu, P., Wang, M., & Zheng, H. (2021). Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. *Science of the Total Environment*, 765. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142795
- Zuhra, Malahayati, N., Emalya, N., Rinaldi, W., & Yunardi, Y. (2021). Microalgae for Simultaneous Removal of Organic and Nitrogenous Compounds from Wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 667(1). doi: 10.1088/1755-1315/667/1/012044

# **ACV DEL TRATAMIENTO PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACOPLA DE CULTIVO DE MICROALGAS**

## **Apéndices**

Apéndice A. Procesos empleados en los flujos de entrada y salida de cada escenario