

ARTÍCULO

APROVECHAMIENTO DE ALGAS EN EL TERRITORIO PATAGÓNICO: EVALUACIÓN DE SU IMPACTO AMBIENTAL

Harnessing of algae in the patagonian territory: assessment of its environmental impact

Ramos, M. ^{1 2} , Ramos, F. D. ^{1 2}  & Casoni, A. I. ^{* 1} 

RESUMEN: El empleo de biomasa de algas marinas macroscópicas bajo el concepto de biorrefinería se presenta como una de las alternativas más prometedoras a la hora de obtener una amplia gama de compuestos mediante la valorización de la biomasa. Sin embargo, en la actualidad, el estudio de biorrefinerías macroalgales se encuentra menos desarrollado que el de sus análogas basadas en biomasa terrestre. En este sentido, resulta clave la validación de este concepto mediante una perspectiva que no solo incluya la factibilidad técnica, sino también cuestiones asociadas a la dimensión ambiental de la sostenibilidad. En virtud de esto, en este trabajo, se propone la evaluación de impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) de una biorrefinería integrada basada en macroalgas patagónicas utilizando una herramienta computacional de acceso libre, OpenLCA. Se considera la producción de 600 t/a de dimetil-isosorbida (DMI) y se compara con la posibilidad de producir alternativamente 322 t/a de DMI y 244 t/a de alginato, equivalente al uso de 1864 t/a de macroalga patagónica. Producir alginato de sodio juntamente con DMI reduce significativamente el impacto ambiental del

1 Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI CONICET-UNS), Camino La Carrindanga km. 7, Bahía Blanca, Argentina.

2 Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina.

* Autor de correspondencia. Andrés Iván Casoni. E-mail: acasoni@plapiqui.edu.ar

Como citar este artículo: Ramos, M., Ramos, F. D. & Casoni, A. I. (2024). Aprovechamiento de algas en el territorio patagónico: evaluación de su impacto ambiental. *Revista FACENA* 34(1), 2-14. Doi: <https://doi.org/10.30972/fac.3417407>

Recibido/Received: 29/12/2023. Revisión: 29/12/2023. Aceptado/Accepted: 15/02/2024.

Editor asociado: Félix Ignacio Contreras 

Publicado en línea: 19/04/2024. ISSN 1851-507X en línea.

proceso en la mayoría de las categorías de impacto analizadas. Por ejemplo, si se toma la categoría de “cambio climático”, el producir ambos compuestos se reduce un 25,8 % el impacto.

PALABRAS CLAVE: Alginato de sodio, Biorrefinería, Dimetil-isosorbida, LCA, Macroalgas patagónicas.

ABSTRACT: The use of macroscopic seaweed biomass within the concept of a biorefinery is presented as one of the most promising alternatives for obtaining a wide range of compounds by harnessing biomass. However, currently, the study of macroalgal biorefineries is less developed than their terrestrial biomass-based counterparts. In this regard, the validation of this concept is crucial, considering not only technical feasibility but also including issues related to the environmental dimension of sustainability. Therefore, this work proposes the environmental impact assessment using a life cycle assessment (LCA) of an integrated biorefinery based on macroalgae, employing an open-access computational tool, OpenLCA. The production of 600 t/yr of dimethyl isosorbide (DMI) is considered and compared to the possibility of alternatively producing 322 t/a of DMI and 244 t/a of alginate, equivalent to the use of 1864 t/yr of Patagonian macroalgae. Producing sodium alginate jointly with DMI significantly reduces the environmental impact among all categories. For instance, if it is considered “climate change”, the impact within this category is reduced 25,8 % when both compounds are produced.

KEYWORDS: Sodium alginate, Biorefinery, Dimethyl isosorbide, LCA, Patagonian macroalgae.

INTRODUCCIÓN

El empleo de macroalgas mediante el concepto de biorrefinería integrada contribuye positivamente a la producción amigable con el ambiente (Zapata-Boada et al., 2021). A pesar de las recientes contribuciones en este tema (Arias et al., 2023; González-Gloria et al., 2021; Kostas et al., 2021), todavía existe una brecha en la comprensión del uso de especies de macroalgas para obtener productos químicos de manera industrial (Sudhakar et al., 2019). En este sentido, los alginatos son

una familia de compuestos que constituyen el principal producto comercial de las macroalgas pardas con una amplia gama de aplicaciones en las industrias de alimentos, cosméticos, farmacéuticos y nutraceuticos. Las algas como *Macrocystis pyrifera* y *Lessonia* sp. (Laminariales, Phaeophyceae) son macroalgas pardas ampliamente distribuidas en las aguas frías de la Patagonia Argentina y su extensa costa (Figura 1) con un gran potencial para su explotación sostenible (Zaixso and Boraso, 2015) en la producción integrada de hidrocoloides, materiales, productos químicos y biocombustibles (Pedrozo *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2021).

Es de profundo interés conocer índices que logren cuantificar qué tan sostenibles



Fig. 1. Distribución geográfica de macroalgas pardas en Argentina (Línea roja)

son estos novedosos procesos. En este sentido podría emplearse el enfoque presentado por Zôre *et al.* (2018) quienes presentan una métrica de la sostenibilidad expresada en términos monetarios, considerando 3 dimensiones: económica, ambiental y social. Sin embargo, en ciertas ocasiones, su empleo es complejo debido a la numerosa cantidad de datos que deben manipularse durante su implementación. Asimismo, se debe contar con el diseño de cada uno de los equipos involucrados en la planta

de producción que se desee evaluar, o al menos, con las dimensiones características de los mismos, de modo tal que pueda estimarse el costo individual del equipamiento. Por otra parte, el pilar social es una componente que habitualmente presenta cierta incertidumbre respecto a su alcance (Zore *et al.*, 2017) ya que resulta dificultoso encontrar una expresión que logre representar las implicancias sociales de la instalación de una nueva planta de producción. Una alternativa a esto último es abordar de manera detallada los problemas ambientales mediante el empleo de la metodología “análisis del ciclo de vida” (LCA, por sus siglas en inglés). Esta herramienta puede identificar no solo los impactos ambientales sino también los beneficios del proyecto mediante técnicas de optimización multiobjetivo que podrían aplicarse a posteriori (González Castaño, 2019) logrando así corroborar las implicancias en otras dimensiones de la sostenibilidad. Por esta razón en este trabajo se propone profundizar en el estudio de la producción de compuestos químicos mediante el empleo de macroalgas patagónicas llevando a cabo una evaluación de impacto ambiental mediante LCA con una herramienta computacional de acceso libre: OpenLCA. El marco propuesto tiene su origen en un trabajo desarrollado previamente (Casoni *et al.*, 2020) para la producción de una molécula de interés farmacéutico a partir de macroalgas pardas: dimetil-isosorbida (DMI).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio sobre la viabilidad ambiental de las biorrefinerías macroalgales en la región de la Patagonia Argentina se enmarca en un estudio realizado previamente por Casoni *et al.* (2020) que sirve de base para nuestra investigación. En la Figura 2 se presenta un esquema simplificado de las rutas de producción involucradas en la biorrefinería considerada en este trabajo. La especie de macroalga utilizada es *Macrocystis pyrifera* cuya biomasa puede ser empleada para la producción de alginato de sodio y también sorbitol. Este último, luego de una deshidratación, da lugar a la molécula plataforma isosorbida, precursora de diferentes productos. El

análisis se centrará en la obtención final de 600 t/a de biosolvente DMI (Casoni *et al.*; 2020). Este escenario se compara con el de obtención de 244 t/a de alginato de sodio y 322 t/a de DMI (Casoni *et al.*; 2022). En ambos casos, se requieren 1864 t/a de macroalga para la obtención de productos.

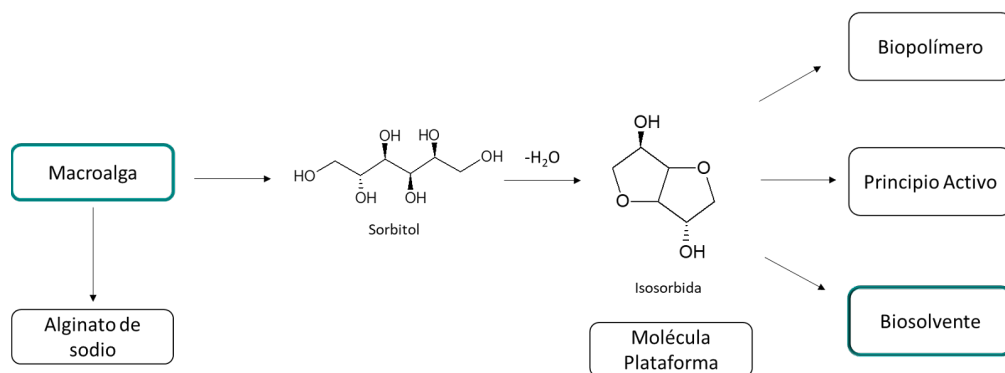


Fig. 2. Esquema simplificado de las rutas de producción de la biorrefinería macroalgal estudiada.

El Análisis del Ciclo de Vida es la herramienta utilizada para evaluar los impactos ambientales y recursos empleados durante todo el ciclo de vida del proceso estudiado. Esto incluye la adquisición de la materia prima, las etapas de diseño y producción, el empaque y distribución, el uso y mantenimiento y la disposición final de los residuos. De acuerdo con los principios establecidos por ISO 14040 (González Castaño *et al.*, 2018) se establecen cuatro etapas para realizar un LCA (Figura 3).

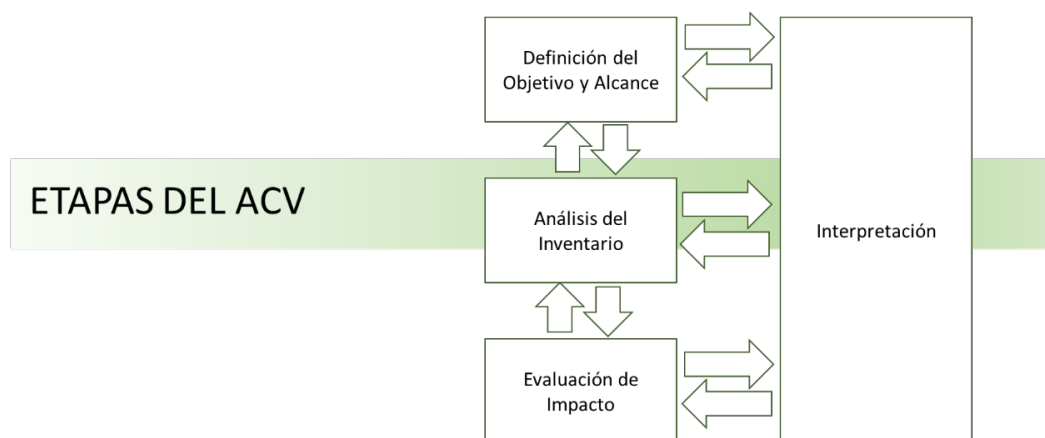


Fig. 3. Esquema de las etapas involucradas en un Análisis de Ciclo de Vida

La primera etapa fue la definición del objetivo y alcance del estudio realizado. Es de suma trascendencia ya que se establecen los límites del sistema y se define a la unidad funcional necesaria para evaluar y comparar con sistemas que posean funciones equivalentes. En este trabajo el LCA se definió como “de la cuna a la puerta” en el que los límites de estudio se establecieron entre las entradas desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se pone en el mercado. Para la unidad funcional se tuvo en cuenta 1864 t de macroalga parda patagónica (correspondiente a un año de operación).

La segunda etapa implicó la realización de un inventario de datos de cada uno de los recursos de entrada y salida que afectan al producto teniendo en cuenta los límites de la biorrefinería estudiada y la unidad funcional previamente establecida. Es importante mencionar que todos los flujos necesarios para llevar a cabo el LCA se obtuvieron a partir de los trabajos previamente publicados por Casoni *et al.* (2020; 2022). En esta etapa se cuenta con bases de datos que contribuyen a recopilación de información de manera confiable para diversos productos y procesos. En el presente trabajo se recurrió al uso de la base de datos Agribalyse la cual es de acceso libre (agribalyse.fr).

La tercera etapa, también conocida como etapa de evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA por sus siglas en inglés) se focalizó en evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida del proceso para comprender de manera más profunda el impacto sobre el ambiente. Este análisis está basado en metodologías y el objetivo es el cálculo de indicadores específicos que relacionan a cada una de las sustancias involucradas en el proceso estudiado con la categoría de impacto. La metodología aplicada fue Environmental Footprint (Golsteijn & Vieira, 2020) que considera diferentes categorías de impacto tales como cambio climático, huella de carbono, eutrofización, acidificación, ecotoxicidad, agotamiento de ozono, entre otros (Figura 4). Dicha metodología está disponible para la base de datos seleccionada (Agribalyse) y en el software específico empleado para desarrollar el análisis de la biorrefinería, OpenLCA.



Fig. 4. Categorías de impacto consideradas en la metodología Environmental Footprint.

La etapa final implica una fase de interpretación donde los esfuerzos se destinan a identificar cómo afectan a los resultados cada una de las suposiciones del modelo. Aquí se logran identificar los aspectos determinantes del proceso productivo que se evalúa y se llevan a cabo recomendaciones para lograr mejoras en términos ambientales. Como es habitual en un LCA, estos estudios se realizan con el fin de comparar 2 escenarios que cumplan similares objetivos. En este sentido, en el presente trabajo se comparó el impacto de una planta de producción de 600 t/a de dimetil-isosorbida (DMI) con una biorrefinería correspondiente a la producción de 322 t/a de DMI y 244 t/a de alginato.

RESULTADOS

En la Figura 5 se pueden observar los resultados de las categorías de impacto analizadas para ambos procesos productivos de aprovechamiento de macroalgas. Al realizar una comparación general de ambos procesos se puede observar que producir alginato de sodio juntamente con DMI reduce significativamente el impacto ambiental del proceso de aprovechamiento de la biomasa algal en la mayoría de las categorías de impacto analizadas. Por otro lado, al producir DMI y alginato de sodio simultáneamente, se presenció un incremento del impacto ambiental en las siguientes categorías:

- Cambio climático- biogénico.

- Ecotoxicidad – agua dulce, inorgánicos.
- Eutrofización terrestre.
- Toxicidad humana – no cáncer, inorgánicos.
- Uso de la tierra.
- Uso de recursos, minerales y metales.

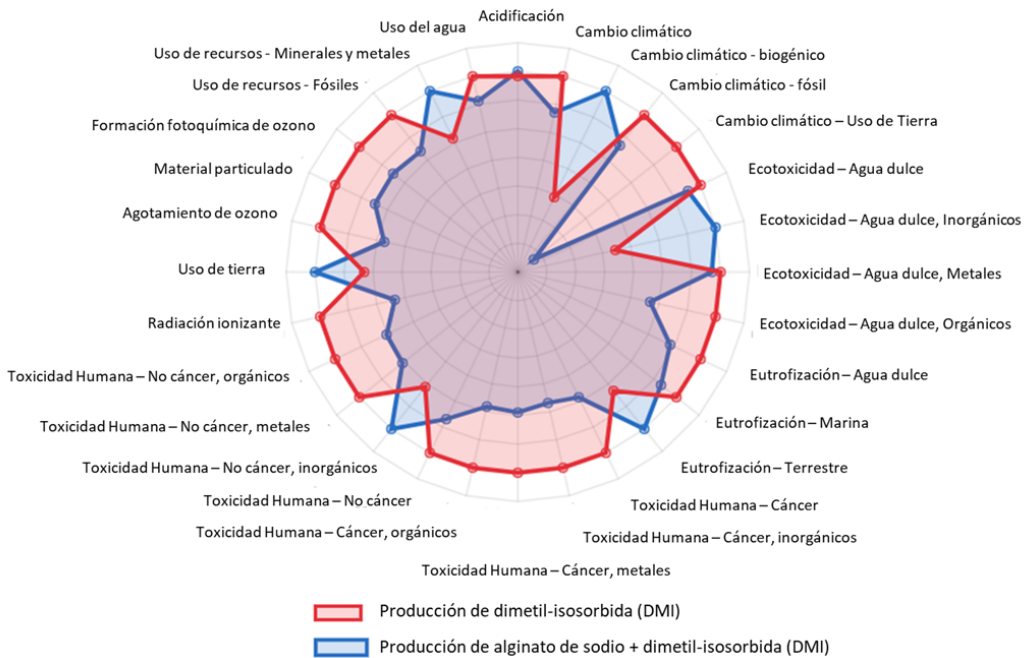


Fig. 5. Comparación de las categorías de impacto ambiental en los procesos estudiados.

Las categorías de impacto previamente mencionadas se analizarán en detalle. Para el resto de las categorías estudiadas se aprecia una notable disminución del impacto al producir al mismo tiempo DMI y alginato de sodio. Esto último se atribuye principalmente a que el proceso de producción de DMI como único compuesto requiere la utilización de solventes orgánicos como el xileno (Casoni *et al.*, 2020) que presentan gran impacto en las diferentes categorías estudiadas. De esta manera al adicionar la ruta de producción de alginato de sodio al proceso de aprovechamiento y al fijar la cantidad de macroalga empleada se reduce la producción de DMI para el caso de la biorrefinería con producción simultánea (600 t/a vs 322 t/a) y, en consecuencia, el requerimiento de solventes orgánicos provoca esta disminución.

Tabla 1. Magnitud de los índices calculados en la evaluación de impacto ambiental.

Categorías de Impacto	Unidades	Producción de DMI	Producción de DMI + Alginato
Acidificación	mol H ⁺ eq	2,73E+00	2,83E+00
Cambio climático	kg CO ₂ eq	6,12E+02	4,54E+02
Cambio climático - Biogénico	kg CO ₂ eq	1,64E+00	9,18E+00
Cambio climático - Fósil	kg CO ₂ eq	6,10E+02	4,45E+02
Cambio climático - Uso de tierra	kg CO ₂ eq	5,91E-01	-1,53E-01
Ecotoxicidad - Agua dulce	CTUe	3,52E+04	3,18E+04
Ecotoxicidad - Agua dulce inorgánicos	CTUe	2,88E+03	9,92E+03
Ecotoxicidad - Agua dulce, metales	CTUe	1,13E+04	1,06E+04
Ecotoxicidad - Agua dulce, orgánicos	CTUe	2,11E+04	1,13E+04
Eutrofización - Agua dulce	kg P eq	9,97E-02	7,65E-02
Eutrofización - Marina	kg N eq	3,70E-01	3,20E-01
Eutrofización - Terrestre	mol N eq	4,39E+01	6,66E+10
Toxicidad Humana - cáncer	CTUh	1,73E-06	9,87E-07
Toxicidad Humana - cáncer, inorgánicos	CTUh	4,54E-16	2,43E-16
Toxicidad Humana - cáncer, metales	CTUh	7,59E-07	4,40E-07
Toxicidad Humana - cáncer, orgánicos	CTUh	9,74E-07	5,47E-07
Toxicidad Humana - no cáncer	CTUh	1,68E-05	1,24E-05
Toxicidad Humana - no cáncer, inorgánicos	CTUh	2,07E-06	3,31E-06
Toxicidad Humana - no cáncer, metales	CTUh	1,39E-05	8,59E-06
Toxicidad Humana - no cáncer, orgánicos	CTUh	9,31E-07	5,64E-07
Radiación Ionizante	kBq U-235 eq	3,01E+01	1,42E+01
Uso de Tierra	Pt	8,30E+02	1,25E+03
Agotamiento de ozono	kg CFC11 eq	1,48E-03	8,10E-04
Material particulado	disease inc.	6,91E-05	4,80E-05
Formación fotoquímica de ozono	kg NMVOC eq	1,97E+00	1,38E+00
Uso de recursos - fósil	MJ	9,05E+03	6,13E+03
Uso de recursos - minerales y metales	kg Sb eq	6,90E-04	1,08E-03
Uso de Agua	m ³	2,54E+02	2,09E+02

DISCUSIÓN

A continuación, se discutirán las diferentes categorías de impacto mencionadas en la sección de resultados. En cuanto a la categoría Cambio climático - biogénico, la ruta de producción de DMI presenta un valor de 1,64 kg CO₂ eq (equivalente) mientras que la ruta que adiciona alginato de sodio presenta un valor de 9,18 kg CO₂ eq (Tabla 1). Esta diferencia se debe a que para la producción de alginato se requiere un tratamiento de bioresiduos mediante compostaje industrial (Dümenci *et al.*, 2023). Esto produce mayores emisiones gaseosas que se traducen en un mayor valor de CO₂ eq. Para el caso de la producción de DMI solamente, la mayor contribución para esta categoría en particular está dada por la producción de electricidad empleada en el proceso.

En el caso de ecotoxicidad - agua dulce, inorgánicos, la ruta sintética del alginato de sodio utiliza cloruro de calcio (CaCl₂) que presenta un factor de caracterización de 301,44 CTUe/kg lo que incrementa en gran medida el impacto sobre esta categoría (9926,53 CTUe). Esto último se podría relacionar con los efectos adversos que los iones de cloruro tienen sobre los organismos acuáticos. Para el caso de producir únicamente DMI, la mayor contribución está dada por la utilización de óxido de magnesio y xileno con un valor de 2880,95 CTUe (comparative toxic unit).

Si se analiza la eutrofización terrestre, el compostaje industrial utilizado para el tratamiento de bioresiduos, la utilización de solventes orgánicos y el uso de CaCl₂ son los que generan las mayores contribuciones para esta categoría con valores de 2,36 mol N eq, 1,8 mol N eq. y 1,37 mol N eq., respectivamente. Mientras que para producir solo DMI, la mayor contribución está dada por los solventes orgánicos con un valor de 3,36 mol N eq. Es importante mencionar, que en la vía de producción de DMI (600 t/a) el impacto es mayor debido a que esta ruta emplea una mayor cantidad de solvente orgánico (xileno) para su obtención respecto a la producción combinada de alginato y DMI (244 y 322 t/a, respectivamente).

Para la categoría de Uso de la Tierra, el proceso que considera tanto el alginato como el DMI presenta una contribución superior debido a que la ruta sintética del alginato requiere la utilización de perlita que adiciona 141,09 Pt sobre el total. Para el proceso de DMI la producción de los solventes utilizados es lo que más contribuye a esta categoría.

Finalmente, para el Uso de recursos, minerales y metales, la diferencia entre ambos casos está dada por el CaCl_2 que se requiere para producir alginato. Cabe destacar que, debido a los insignificantes valores obtenidos para la categoría Toxicidad humana, no se analizan en detalle.

CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida en el proceso de aprovechamiento de macroalgas patagónicas que permitió comparar los impactos ambientales de la producción de DMI con la producción conjunta de DMI y alginato de sodio empleando el concepto de biorrefinería macroalgal. El estudio desarrollado permitió determinar que la producción conjunta de DMI con alginato muestra una disminución en la mayoría de las categorías de impacto ambiental. Se halló que el empleo de xileno en la etapa de producción de isosorbida en la ruta sintética de DMI, es la principal fuente de deterioro en dichas categorías de impacto. Por esta razón es esperable que la producción adicional de alginato de sodio empleando un mismo caudal de macroalga patagónica, no solo contribuiría positivamente en términos económicos debido a un mayor precio en el mercado respecto del DMI, sino que también aporta beneficios desde el punto de vista ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen debidamente a FONCYT y CONICET por el financiamiento a través del proyecto PICT-2021-I-INVI-00800.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Matías H. Ramos: Software, Investigación, Escritura, Idea y Conceptualización.

Fernando D. Ramos: Software, Investigación, Escritura, Idea y Conceptualización.

Andrés I. Casoni: Software, Investigación, Escritura, Idea y Conceptualización. Adquisición y Administración de financiamiento.

REFERENCIAS

Arias, A; Feijoo, G; Moreira, M.T. 2023. Macroalgae biorefineries as a sustainable resource in the extraction of value-added compounds. *Algal Research*, 69, 102954

Casoni, A.I; Pedrozo, H.A; Ramos, F.D; Estrada, V; Diaz, M.S. 2022. Macroalgae-based integrated biorefinery for hydrocolloids, chemicals and advanced biofuels production. *Computer Aided Chemical Engineering*, 51, 715-720.

Casoni, A.I; Ramos, F.D; Estrada, V; Diaz, M.S. 2020. Sustainable and Economic analysis of Marine Macroalgae Based Chemical Production - Process Design and Optimization. *Journal of Cleaner Production*, 276, 122792.

Dümenci, N.A.; Temel, F.A.; Turan, N.G. 2023. Role of different natural materials in reducing nitrogen loss during industrial sludge composting: Modelling and optimization. *Bioresource Technology*, 385, 129464.

Golsteijn, L; Vieira, M. 2020. Applicability of the European Environmental Footprint (EF) methodology in Southern Mediterranean countries— learnings and recommendations for enabling EF-compliant studies in regions outside of Europe. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 2407-2416.

González-Castaño, F.A; Bandoni, A; Díaz, M.S. 2018. Towards Economically and Environmentally Optimal Operations in Natural Gas Based Petrochemical Sites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57, 5999-6012.

González Castaño, F.A. 2019. Análisis de ciclo de vida y optimización matemática como herramientas para la producción sustentable de energía y productos químicos. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur.

González-Gloria, K.D; Rodríguez-Jasso, R.M; Aparicio, S.E; Chávez González, M.L; Kostas, E.T; Ruiz, H.A. 2021. Macroalgal biomass in terms of third-generation biorefinery concept: Current status and techno-economic analysis - A review. *Bioresource Technology Reports*, 16, 100863.

Kostas, E.T; Adams, J.M.M; Ruiz, H.A; Durán-Jimenéz, G; Lye, G.J. 2021. Macroalgal biorefinery concepts for the circular bioeconomy: A review on biotechnological developments and future perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 151, 111553.

Pedrozo, H.A; Rodriguez Reartes, S.B; Vecchiotti, A.R; Diaz, M.S; Grossmann, I.E. 2021. Optimal design of ethylene and propylene coproduction plants with generalized disjunctive programming and state equipment network models. *Computers & Chemical Engineering*, 149, 107295.

Sudhakar, M.P; Kumar, B.R; Mathimani, T; Arunkumar, K. 2019. A review on bioenergy and bioactive compounds from microalgae and macroalgae-sustainable energy perspective. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1320-1333.

www.agribalyse.fr (Último acceso 19.10.2023)

Zapata-Boada, S; Gonzalez-Miquel, M; Jobson, M; Cuellar-Franca, R. 2021. Integrating process simulation and life cycle assessment to evaluate the economic and environmental performance of algae biodiesel. *Computer Aided Chemical Engineering*, 50, 1903-1908.

Zore, Ž; Čuček, L; Kravanja, Z. 2017. Syntheses of sustainable supply networks with a new composite criterion - Sustainability profit. *Computers & Chemical Engineering*, 102, 139-155.

Zore, Ž; Čuček, L; Sirovnik, D; Pintarič, Z. N; Kravanja, Z. 2018. Maximizing the sustainability net present value of renewable energy supply networks. *Chemical Engineering Research & Design*, 131, 245-265.