



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ainia
centro tecnológico

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA
PRODUCCIÓN DE *LEMNA*.
COMPARACIÓN CON OTRAS FUENTES
DE PROTEÍNA VEGETAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E
INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNO: JOSEP GARCIA LLORENS

TUTORA ACADÉMICA: NEUS SANJUÁN PELLICER

COTUTORA: GABRIELA CLEMENTE POLO

Curso Académico: 2019/2020

VALÈNCIA, febrero de 2020

TÍTULO: EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE LEMNA. COMPARACIÓN CON OTRAS FUENTES DE PROTEÍNA

Autor: Josep Garcia Llorens

Tutora académica: Neus Sanjuán Pellicer

Cotutora: Gabriela Clemente Polo

RESUMEN: El esperado aumento en la población a nivel mundial supone un importante reto para los años venideros. La necesidad de alimentar a toda la población de manera sostenible hace necesaria la búsqueda de fuentes alternativas de nutrientes que generen un menor impacto medioambiental y sean rentables técnica y económicamente.

El objetivo del presente trabajo es el estudio del impacto medioambiental de la Lemna (o lenteja de agua) como fuente de proteína de alto rendimiento y de bajo impacto mediante el análisis de ciclo de vida. En el estudio se tienen en consideración desde el cultivo hasta el cosechado y posterior transformación del producto. Para abordar el estudio se simulan dos escenarios de cultivo, bien en abierto o en cerrado, lo que permite aumentar el rendimiento y extender el período productivo a todo el año. La metodología empleada es la que se detalla en la normativa ISO 14040:2006 para el Análisis de Ciclo de Vida. Los resultados se expresarán en base a dos unidades funcionales, 1 kg de materia seca y 1 kg de proteína de lemna, respectivamente. Se han considerado la producción de la infraestructura, la fabricación de los fertilizantes, la reposición del agua perdida por evapotranspiración, así como la energía necesaria para la agitación, el cosechado y el secado posterior de la lemna. Los resultados obtenidos se compararán con los del ACV de otras fuentes proteicas de origen vegetal mediante una revisión bibliográfica de publicaciones científicas.

Los resultados muestran que los impactos de producir en abierto y en cerrado son muy similares, pues la infraestructura de la cubierta que se ha considerado en el estudio tiene una larga vida. Además, se observa que la fabricación de los fertilizantes necesarios para el cultivo es la etapa que más contribuye a todas las categorías de impacto. Pese a ello, la lemna, en comparación con otras fuentes de origen vegetal, se posiciona como una alternativa eficaz y sostenible ambientalmente para la producción de proteínas dado su alto rendimiento y su bajo impacto medioambiental.

PALABRAS CLAVE: Lemna, Lenteja de agua, Análisis de Ciclo de Vida, ACV, proteína, sostenible.

RESUM: L'esperat augment de la població a nivell mundial suposa un important repte per als anys vinents. La necessitat d'alimentar a tota la població d'una manera sostenible fa necessària la recerca de fonts alternatives de nutrients que generen un menor impacte mediambiental i siguen rentables tècnica i econòmicament.

L'objectiu del present treball és l'estudi de l'impacte mediambiental de la Lemna (o lletilla d'aigua) com a font de proteïna d'alt rendiment i de baix impacte mitjançant l'anàlisi del cicle de vida. En l'estudi es tenen en consideració des del cultiu fins la collita i posterior transformació del producte. Per fer front a l'estudi, s'han simulat dos escenaris de cultiu, bé en obert o en tancat, el que permet augmentar el rendiment i estendre el període productiu a tot l'any. La metodologia empleada és la que es detalla en la normativa ISO 14040:2006 per a l'Anàlisi de Cicle de Vida. Els resultats s'expressaran en base a dos unitats funcionals: 1 kg de matèria seca y 1 kg de proteïna de lemna, respectivament. S'ha considerat la producció de la infraestructura, la fabricació dels fertilitzants, la reposició de l'aigua perduda per l'evapotranspiració, així com l'energia necessària per a l'agitació, la collita i el posterior assecat de la lemna. Els resultats obtinguts es compararan amb els de ACV d'altres fonts proteïques d'origen vegetal mitjançant una revisió bibliogràfica de publicacions científiques.

Els resultats mostren que els impactes de produir en obert i en tancat són molt similars, doncs la infraestructura de la coberta que s'ha considerat en l'estudi presenta una llarga vida. A més, s'observa que la fabricació dels fertilitzants necessaris per al cultiu és la etapa que més contribueix en totes les categories d'impacte. Malgrat això, la lemna, en comparació amb altres fonts vegetals, es posiciona com una alternativa eficaç i sostenible ambientalment per a la producció de proteïnes degut al seu alt rendiment i el seu baix impacte mediambiental.

PARAULES CLAU: Lemna, lletilla d'aigua, Anàlisi de Cicle de Vida, ACV, proteïna, sostenible.

ABSTRACT: The expected increase of the world's population is an important challenge for the upcoming years. The need to feed the population in a sustainable way makes it necessary to find alternative sources of nutrients that generate a lower environmental impact and, at the same time, are technically and economically profitable.

The aim of this study is to evaluate the environmental impact of the Lemna (or duckweed) as a high performance and low impact protein source by means of life cycle assessment. The study considers from cultivation to harvesting and subsequent product transformation. To address the study, two cultivation scenarios are simulated, either in open or closed method, which allows increasing the yield and extending the productive period throughout the year. The methodology used is the one detailed in ISO 14040: 2006 for Life Cycle Assessment. The results are based on two functional units: 1 kg of dry matter and 1 kg of lemna protein. The production of the infrastructure, fertilizers manufacturing, the replacement of the water lost by evapotranspiration, as well as the energy necessary for agitation, harvesting and subsequent drying of the lemna have been considered. The results evaluated are compared with those of LCA from other protein sources of plant origin through a literature review of scientific publications.

The results show that the impacts of producing in open and closed pond are very similar, due to the long life of the roof infrastructure. In addition, fertilizers manufacturing, necessary for cultivation, is the stage contributing the most to all the impact categories. Despite this, lemna, in comparison with the other vegetable sources, is positioned as an effective and sustainable alternative for protein production given its high yield and low environmental impact.

KEY WORDS: Lemna, duckweed, Life Cycle Assessment, LCA, protein, sustainable.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Producción de alimentos. Retos para el futuro.....	1
1.2 Lemna: distribución, taxonomía y morfología.....	2
1.3 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	3
1.4 Justificación y objetivo del estudio.....	4
2. MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1 Definición del objetivo y el alcance del estudio.....	4
2.1.1 Definición del objetivo.....	4
2.1.2 Definición del alcance.....	5
2.1.3 Descripción del sistema estudio.....	6
2.2 Análisis de inventario.....	8
2.3 Evaluación del impacto ambiental. Categorías de impacto.....	9
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
3.3 Evaluación del impacto.....	11
3.3 Análisis de contribución.....	12
3.3 Comparativa con otros estudios.....	16
4. CONCLUSIONES	19
5. BIBLIOGRAFÍA	20

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Imagen de la lemna

Figura 2. Diferentes tipos de lemna y morfologías

Figura 3. Límites del sistema de estudio para el ACV para el cultivo de la lemna

Figura 4. Imágenes de las instalaciones destinadas al estudio de la lemna

Figura 5. Análisis de la contribución a cada categoría de impacto de las distintas etapas para el cultivo en abierto

Figura 6. Contribución de cada fertilizante a la etapa de fabricación de fertilizantes

Figura 7. Impacto de las diferentes etapas para el sistema de cultivo cerrado

Figura 8. Impacto en porcentaje de cada componente de la estructura del invernadero según categoría de impacto

Tabla 1. Datos de inventario para la construcción de las infraestructuras

Tabla 2. Consumo energético en el cultivo y procesado de la lemna

Tabla 3. Necesidades de nutrientes de la lemna y de fertilizantes aplicados

Tabla 4. Categorías de impacto ambiental consideradas en el estudio

Tabla 5. Resultados de la evaluación de impacto del cultivo de lemna para cada escenario.

Tabla 6. Resultados de la evaluación de impacto del cultivo de la lemna para cada escenario.

Tabla 7. Tabla comparativa de los resultados con las diferentes fuentes bibliográficas

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Producción de alimentos. Retos para el futuro

En la actualidad, el creciente aumento de población y la preocupación por acabar con el hambre en el mundo supone un importante reto para el futuro. Tanto es así que este es el segundo Objetivo para el Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Dichos objetivos se recogen en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, bajo el nombre de “Hambre cero” (Cumbre de la ONU sobre el Desarrollo Sostenible, 2015). Es por este motivo que surge la necesidad de producir más alimentos de una forma sostenible para satisfacer las demandas de la población. Entre los nutrientes de mayor importancia en la nutrición y de más difícil acceso, sobre todo en países en vías de desarrollo, están las proteínas (FAO, 2014). Así pues, según la OMS (WHO, 2007), la ingesta diaria de proteínas en la dieta ha de suponer en torno a 132 mg de nitrógeno por kg de peso por día o 0,83 gramos de proteína por kg de peso y día.

Entre las fuentes de proteína más demandadas destaca la de origen animal. Esta fuente genera uno de los mayores impactos ambientales en la alimentación debido en gran parte a la baja eficiencia de los animales en la conversión de los alimentos que ingieren en proteínas. Se estima que entorno al 75-90% de la energía consumida por el animal, se transforma para cubrir los procesos fisiológicos o se pierde en el estiércol o subproductos como piel y huesos (Djekic & Tomasevic, 2016). Además, el sector agrícola emite en torno a un 25-33% del total de los gases de efecto invernadero (Clarck & Tilman, 2017) de los cuales, tres cuartas partes de las emisiones totales se asocian a la producción de carne (Forero-Cantor et al., 2020). Además, el consumo excesivo de carnes rojas y, sobre todo, carne procesada, se asocia con efectos perjudiciales para la salud (Micha et al., 2012).

Con todo, las nuevas tendencias y la creciente demanda del mercado hacia la búsqueda de fuentes alternativas de proteína han conducido a la investigación de alternativas sostenibles para la obtención de este macronutriente. Las principales propuestas y alternativas que se barajan tratan fuentes vegetales de gran productividad y riqueza proteica como la soja, cáñamo, colza o alfalfa, así como algas (wakame, micro y macroalgas) e insectos. Otras fuentes, como el cultivo *in vitro* de proteína cárnica, al estar en etapas preliminares, distan mucho de posicionarse como alternativa sostenible, ya que sus requerimientos energéticos son en estos momentos notoriamente mayores al de la carne tradicional.

Si bien muchas de estas alternativas se proponen como más sostenibles ambientalmente, es necesario demostrar que efectivamente es así. El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología orientada al producto que permite evaluar sus impactos sobre el medioambiente a lo largo de su vida completo. El ACV se ha aplicado con éxito a multitud de productos alimentarios.

Por lo que respecta a este trabajo, se centra en el cultivo y uso de la Lemna (Figura 1) como fuente proteica de fácil producción y procesado. Estas plantas son ricas en proteínas, vitaminas y carbohidratos, por lo que son ampliamente usadas en alimentación animal.



Figura 1. Imagen de la lemna (<https://flora-on.pt/#/h5d1t>)

Pese a los buenos resultados y los beneficios que presenta, la lemna en Europa se encuentra dentro de los denominados *novel food*. Así pues, un uso alimentario de este producto, fuera de infusiones u otros preparados menores, debe ser autorizado de conformidad con el Reglamento (UE) 2015/2283 sobre nuevos alimentos (*EU Novel food catalogue*, consultado en enero 2020). Con todo, dadas las capacidades y beneficios que puede aportar, se prevé pueda constituirse como alimento (Van der Spiegel et al., 2013). Su aceptación como fuente de alimento humano necesita investigaciones exhaustivas con respecto a su valor nutritivo, rendimiento a gran escala, oferta económica y sostenible en el mercado (Appenroth et al., 2017). Además, la promoción de este producto debería de basarse, entre otros aspectos, en su supuesto beneficio ambiental.

1.2 Lemna: distribución, taxonomía y morfología

La lemna, más comúnmente conocida como lenteja de agua o en inglés *duckweed*, se trata de una especie vegetal acuática macrófila, del género plantae. Pertenece a la familia de las *Lemnaceae*, compuesta por cinco géneros: Lemna, Spirodela, Wolffia, Wolffiella, Landoltia, y presenta más de 40 especies (Linnaeus, 1753). En Europa, las más prolíficas son la *Lemna minor* y la *Lemna gibba*. Esta especie, soporta un amplio rango de temperaturas que oscilan entre los 5-30°C y toleran un amplio espectro de pH, siendo 15-18°C y 4,5-7,5 el rango de temperatura y pH de crecimiento óptimo respectivamente (Rook, 2002). Suele presentar frondes ovalados solitarios o bien formando grupos de entre 2-50 frondes. Este tipo de planta tiende a crecer en aguas estancadas o de poca corriente, especialmente en zonas acuáticas eutrofizadas, debido a su alta capacidad de absorción de nitrógeno y fósforo. Además, se caracteriza por su elevado índice de crecimiento, ya que, en condiciones ideales, en 24h sería capaz de duplicar su peso (Zhao et al., 2012; Ge et al., 2012). Entre sus características destaca que, al tratarse de una especie acuática de libre flotación, permite que su recolección o cosechado sea muy sencillo, lo cual posibilita un ahorro energético destacable además de un cultivo en continuo (Duan et al., 2013).

Respecto la distribución de la planta, esta se encuentra a lo largo y ancho del planeta. Así pues, se han hallado ejemplares de esta en Europa, Asia, Australia y Nueva Zelanda (Armstrong 2003).

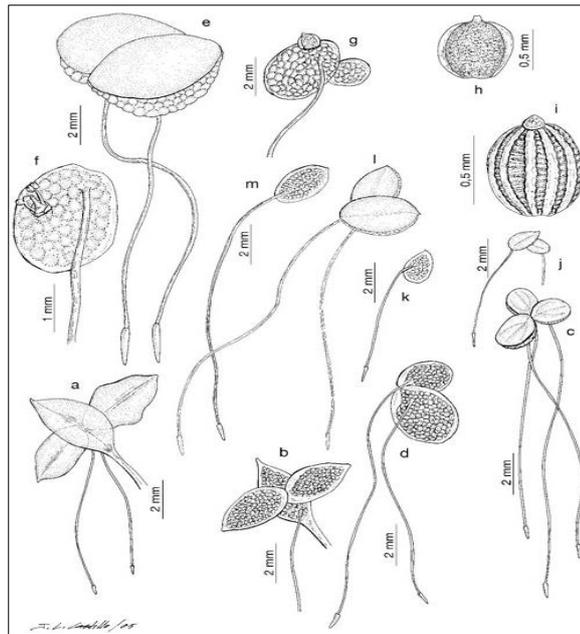


Figura 2. Diferentes tipos de lemna y morfologías. (Galán & Castroviejo, 2006).

Actualmente el interés en esta especie estriba en que la lemna (Figura 2) es capaz de asimilar y nutrientes metales pesados y sustancias químicas del agua, por lo que se utilizan como agentes de fitorremediación en aguas residuales (Mkandawire, 2007; Ekperusi, 2019), ya que crecen en abundancia en agua extensivamente eutrofizadas. Otro uso es la transformación de la biomasa cultivada en aguas residuales a etanol (Ge, et al. 2012). Además, también pueden ser empleadas como fertilizante (Ahmad, 1990) o como bioindicador de la cantidad de mercurio en aguas (Posada & Arroyave, 2006). Por otra parte, su excelente perfil nutricional ha contribuido a su uso como fuente de alimentación animal (Goopy & Murray 2003), por ejemplo, para alimentación en gallinas, observándose un efecto positivo en la producción de huevos (Anderson et al. 2011), e incluso se han estudiado la aceptabilidad de este producto al incorporar esta planta en la alimentación humana (de Beukelaar et al. 2019). Es en el ámbito de alimentación humana donde, debido a sus propiedades, y valores nutricionales se prevé, tras su estudio detallado, sea una excelente alternativa en la dieta (Appenroth et al., 2017).

1.3 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV (en inglés *Life Cycle Assessment* o, según sus siglas, LCA) constituye una poderosa herramienta para el cálculo del impacto medioambiental. El ACV aborda los aspectos e impactos ambientales potenciales durante todo el ciclo de vida de un producto, es decir, desde la adquisición de la materia prima, hasta la producción, uso, tratamiento, reciclaje y su gestión final. La gran variedad de procesos y productos implicados en la producción de las materias primas agrícolas suponen un importante reto para el cálculo y dimensionamiento de la carga ambiental del producto final. No obstante, el alcance de un ACV dependerá del sujeto y uso previsto del estudio (ISO 14040, 2006).

Además, la interpretación de los resultados del ACV permite detectar los puntos críticos del sistema, es decir, las etapas que suponen un mayor impacto y las categorías de impacto más relevantes ya sean el consumo de agua, uso de suelo, ecotoxicidad y emisiones entre otras.

Respecto a los ACV relativos a fuentes de proteínas, hay que destacar entre otros, estudios sobre el impacto ambiental de aislados proteicos de haba (Hannele et al. 2019), aislados de soja (Berardy et al., 2015), o quinua (Cancino-Espinoza et al., 2018) entre otros. Además, se pueden encontrar diversas publicaciones donde se comparan diferentes alimentos proteicos teniendo en cuenta su impacto a lo largo de su ciclo de vida. Un ejemplo de ello es la comparación entre concentrados proteicos de soja verso un concentrado de algas marinas (Halfdanarson, et al. 2019), entre diferentes especies de algas y fuentes tradicionales de proteína (Smetana, 2017).

1.4 Justificación y objetivo del estudio

Este trabajo nace de la colaboración de la Cátedra AINIA con el departamento de Tecnología de Alimentos de la UPV en la que AINIA ha facilitado los datos sobre el cultivo, productividad y características de la lemna procedentes, entre otras, de las pruebas demostrativas de cultivo de lemna desarrolladas en el marco del proyecto LIFE LEMNA LIFE15 ENV/ES/000382.

Este estudio pretende evaluar las ventajas ambientales potenciales del uso de la lemna como fuente alternativa de proteína. En concreto, se pretende realizar un ACV de la lemna y comparar los resultados obtenidos con los de otras fuentes proteicas vegetales más extendidas como la soja, algas, legumbres, etc.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La determinación y la evaluación de los impactos producidos por el cultivo y procesado de la lemna se ha realizado según la norma internacional ISO 14040:2006. Según dicha norma un ACV comprende las fases que se desarrollarán en los apartados siguientes: definición del objetivo y alcance del estudio, análisis de inventario (LCI), evaluación del impacto ambiental (LCIA) y finalmente, la interpretación de los resultados del ciclo de vida (ISO 14040, 2006).

2.1 Definición del objetivo y el alcance del estudio

2.1.1 Definición del objetivo

Tal cómo se ha comentado en el apartado 1.4, el objetivo del estudio es calcular los impactos sobre el medioambiente del cultivo y procesado de la lemna y compararlos con el de otras fuentes alternativas de proteína vegetal. Los datos empleados para comparar dicha fuente de proteína con otras fuentes se basan en una recopilación bibliográfica a partir de artículos y publicaciones científicas. El creciente aumento de la población y la demanda de fuentes de proteína alternativas

a las convencionales supone un importante reto para el futuro y para la industria agroalimentaria a nivel mundial. Este trabajo pretende abordar el caso de la lemna como fuente sostenible de proteína y contribuir de esta manera al desarrollo de las investigaciones e información sobre esta planta. Así pues, la elaboración del presente ACV supone una contribución al desarrollo en la búsqueda de nuevas fuentes sostenibles de alimentos y, de este modo, posicionarse como una alternativa real a las fuentes de proteína de mayor impacto.

Respecto a la lemna, no existe ninguna referencia bibliográfica que detalle su impacto en el medio como consecuencia de su cultivo y/o transformación. Este estudio permite abordar de una manera pionera el impacto derivado de su cultivo a mediana escala.

2.1.2 Definición del alcance

El alcance de un ACV implica definir de forma clara la unidad funcional (UF) a utilizar en el estudio, así como los límites del sistema. El alcance del estudio se debe definir de tal manera que los sistemas puedan ser comparados mediante el uso de la misma unidad funcional y otras consideraciones metodológicas equivalentes. La UF se refiere a la base del cálculo a utilizar en el ACV y sirve de referencia para facilitar la comparación con los resultados extraídos de otros sistemas similares (Brentrup et al., 2004). Por ello Al tratarse de un estudio comparativo, se debe seleccionar una UF que refleje la función a comparar. En este caso, la revisión de la bibliográfica disponible muestra que se han utilizado diferentes UF, por lo que se han escogido dos unidades funcionales: (1) 1 kilogramo de lemna en base seca, con una concentración proteica de 38,8 kg de proteína/100 kg de lemna en base seca y, con el fin de facilitar la comparación con otros estudios y teniendo en cuenta que la función de estos es proveer fuentes alternativas de proteína se ha considerado como UF alternativa (2) 1 kg de proteína.

Los límites del sistema determinan el alcance que definen los procesos y las etapas a incluir dentro del ACV. En el presente trabajo, se consideran dentro de los límites del sistema los procesos relacionados con el cultivo y procesado de la lemna para la obtención del producto final acorde con la UF del estudio (Figura 3). Esto engloba desde la producción de las materias primas necesarias para el cultivo, concretamente la producción de fertilizantes, hasta el procesado del producto resultante de la cosecha, así como la producción de electricidad y otras fuentes de energía necesarias para el cultivo y procesado de la lemna. En este estudio, se decidió no incluir etapas posteriores a la obtención del producto final. Así pues, el impacto derivado de la distribución o del uso que se le pueda dar al producto final, no se han incluido debido a la alta incertidumbre que presentan.

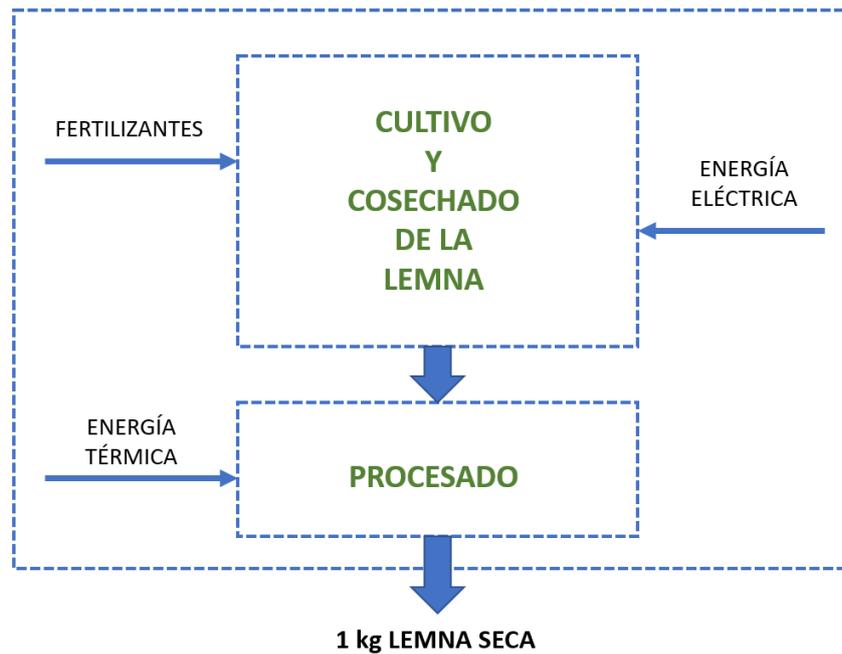


Figura 3. Límites del sistema de estudio para el ACV para el cultivo de lemna.

En cuanto a los límites temporales se ha considerado un día. Este límite temporal, viene determinado porque debido a la alta productividad de la lemna esta se recolecta a diario.

2.1.3 Descripción del sistema estudio

El sistema estudiado se trata de la planta piloto situada en el centro tecnológico AINIA en la valenciana localidad de Paterna. La infraestructura para el cultivo de la lemna consiste en una balsa plástica cuyo interior alberga el agua enriquecida que servirá de medio para el crecimiento de la lemna. El laboratorio cuenta con tests de cultivo que van de 0,5 L hasta los 1.500 L (Figura 4). Así pues, en el mismo centro se realiza el procesamiento de la materia y la recogida de los datos de consumo, tanto de los insumos necesarios para su crecimiento como de la energía necesaria para la obtención del producto final. Para el presente estudio, se ha considerado un cultivo en intensivo, como se realiza en algunos países como Chile, Argentina o EE. UU., por lo que se emplea una balsa de material geotextil como soporte para la producción de lemna, ya que es el material empleado a tal fin por sus prestaciones y características.



Figura 4. *Imágenes de las instalaciones destinadas al estudio de la lemna*

El cultivo de la lemna se considera una fuente de biomasa de alta productividad, pudiendo llegar a valores de 73 t m.s./ha·año o lo que es lo mismo 20 g ms/m²·día en condiciones casi óptimas (Landolt & Kandeler, 1987). Pese a ello, datos más realistas cifran rendimientos sobre 20-40 t m.s./ha·año dependiendo de la especie y/o de la época del año considerada (Leng, 1999), (AINIA, 2019).

En el sistema, el agua sustraída tanto por la incorporación en la biomasa como la emitida por los procesos de evapotranspiración de la planta y las posibles pérdidas ocasionadas durante el cosechado se repone diariamente para mantener los niveles correctos en el sistema, de tal modo que permite el funcionamiento en continuo del sistema y la balsa nunca queda vacía. El agua incorporada en el sistema se enriquece con fertilizantes para satisfacer la demanda del cultivo, ya que es la única fuente de nutrientes que dispone.

Tras el cosechado de la lemna se procede al secado. El secado se realiza mediante el uso de un secadero de bandas con aire caliente cuya fuente de energía es el gas natural. Toda la planta es aprovechable, por lo que no presenta desechos. Por este motivo, tras el cosechado se puede efectuar el secado sin ninguna etapa intermedia de eliminación de partes, con ello, se produce un abaratamiento del proceso a diferencia de otras fuentes vegetales.

Para el cultivo de la lemna se consideran dos escenarios, en abierto y cerrado. El cultivo en abierto funciona los meses de marzo a noviembre, es decir, un total de 9 meses, y se consigue una productividad media de 5,5 g ms/m². El cultivo cerrado implica el uso de una cubierta similar a la de un invernadero para simular las condiciones de mejor rendimiento de la lemna, en aras de conseguir una mayor productividad en el cultivo, pues el cultivo se puede realizar todo el año, incluso los meses más fríos, y la productividad es mayor, en torno a 6,5 g ms/m²·día. En este escenario, además de los inputs considerados en el cultivo en abierto, se han tenido en cuenta los materiales para la construcción del invernadero.

2.2 Análisis de inventario

El Análisis de inventario (LCI según su acrónimo en inglés), es la segunda fase de un ACV. Consiste en realizar un inventario detallado de todos los datos medioambientalmente relevantes, tanto los que afectan a los insumos de entrada (fertilizantes y energía) como los de salida (emisiones al aire, agua y/o suelo). Así pues, supone la recopilación del conjunto de datos que van a ser utilizados en el estudio. En este caso, los datos sobre el cultivo y procesado han sido proporcionados por el centro de investigación AINIA a partir de estudios en su planta piloto.

Los datos correspondientes a la fabricación de los fertilizantes necesarios para el cultivo de la lezna se tomaron de la base de datos de GaBi 6.1 (Thinkstep AG, Leinfelden-Echterdingen, 2017) así como todos los correspondientes a los procesos de fabricación de los materiales para la construcción de la balsa y la estructura del invernadero. Por otro lado, los datos referentes a la producción del mix eléctrico español y a la combustión del gas natural empleado en el secado fueron obtenidos de la base de datos de Ecoinvent v3.5 (Wernet et al., 2016).

En el caso del cultivo cerrado, los datos referentes a la cubierta se tomaron de Antón (2004), dónde se tiene en consideración los materiales necesarios para la construcción de un invernadero industrial mediterráneo, así como la vida útil media de cada material. Hay que señalar que en el presente estudio se ha tenido en cuenta el como límite temporal 1 día, por lo que a cada material se ha dividido por sus días de vida útil. Además, en el caso del cultivo de la lezna, ha sido necesaria la búsqueda de materiales de recubrimiento y estancado (geotextiles) para la construcción de la balsa donde efectuar el cultivo. Los datos de la estructura se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de inventario para la construcción de las infraestructuras

CONCEPTO	MATERIAL	peso kg	densidad kg·m³	vida útil años
Estructura de invernadero				
Pilares, curvas, tirantes...	Acero	11.255,0	7.900	20
Estructura ventanas laterales	Acero	300,6	7.900	20
Estructura ventanas cenitales	Acero	1.512,2	7.900	20
Canal recogida aguas	Acero	2.765,0	7.900	20
Tubería conducción de lluvia	Cloruro polivinilo	188,3	1.400	10
Cimentaciones	Hormigón	110,0	2.870	20
Material de cubierta				
Plástico de la cubierta, film	LDPE	531,6	920	3
Plástico de la cubierta, placa	Policarbonato	2.829	1.000	12
Puertas	Policarbonato	12,0	1.000	12
Barras sujeción plástico	Polietileno	362,3	1.450	5
Material de la balsa				
Plástico de recubrimiento	Polipropileno	500	950	50

Respecto al consumo energético correspondientes al sistema de agitación, la recolección, así como del posterior proceso de secado, se recogen en la tabla 2.

Tabla 2. Consumo energético en el cultivo y procesado de la lezna

FUENTE DE CONSUMO	CONSUMO TOTAL
Agitación	0,9 Wh/m ²
Cosechado	1,25 Wh/m ²
Energía térmica del proceso de secado	0,83 kWh/kg ms
Electricidad consumida en el secado	0,32 kWh/kg ms

Las necesidades de nutrientes esenciales (N, P y K), así como las dosis de fertilizantes aplicados para cubrir dichas necesidades se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Necesidades de nutrientes de la lezna y de fertilizantes aplicados.

Necesidades cultivo	Dosis de fertilizante
0,341 kg N/m ² ·día	1,62 kg de sulfato amónico/m ² ·día
0,121 kg P/m ² · día	0,54 kg de ácido fosfórico/m ² ·día
0,3245 kg K/m ² · día	0,65 kg de sulfato potásico/m ² ·día

2.3 Evaluación del impacto ambiental. Categorías de impacto

La última etapa para la realización de un ACV es la Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (LCIA en inglés), que consiste en interpretar los datos de inventario para de esta forma comprender y evaluar la magnitud y la importancia de los impactos ambientales potenciales del sistema a estudio (ISO 14040, 2006). En la Tabla 4, se mencionan y describen las categorías de impacto evaluadas en este estudio, que así mismo, servirán de base para la comparación con los diferentes estudios revisados. El método empleado para la caracterización de las categorías de impacto analizadas es el ReCiPe 2016 v1.1. (Goedkoop et al., 2013).

Tabla 4. Categorías de impacto ambiental consideradas en el estudio.

CATEGORÍA DE IMPACTO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES*
CC-Cambio climático (Climate change)	Aumento en promedio de la temperatura de la atmósfera y de los océanos producido por las emisiones de gases de efecto invernadero.	kg de CO ₂ equivalentes
FP-Formación de partículas (Particulate matter formation)	Pequeñas partículas de <2,5 micrones de diámetro capaces de generar efectos nocivos sobre la salud. Generados por las emisiones de partículas y sus precursores (NO _x , SO _x , NH ₃).	kg PM 2,5 equivalentes
ARF-Agotamiento de recursos fósiles (Fossil depletion)	Uso de combustibles procedentes del petróleo, del carbón o del gas natural no renovables.	kg de petróleo equivalentes

CATEGORÍA DE IMPACTO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES*
CAD-Consumo de agua dulce (freshwater consumption)	Uso o consumo de agua dulce. Este concepto ha llevado al desarrollo de la llamada Huella Hídrica.	m ³
ETA-Ecotoxicidad del agua dulce (Freshwater ecotoxicity)	Mecanismo toxicológico producido por la liberación de sustancias nocivas para el medioambiente. Pueden cambiar la estructura y función del ecosistema.	kg 1,4 DB equivalentes
EU-Eutrofización (Freshwater eutrophication)	Crecimiento excesivo de algas y plantas debido vertidos en agua dulce como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes. La degradación de la materia orgánica provoca un alto consumo de oxígeno.	kg de P equivalentes
TH-Toxicidad humana (Human toxicity)	Efectos perjudiciales en la salud humana por absorción de sustancias tóxicas carcinogénicas y no carcinogénicas ya sea por inhalación, ingesta o a través de la piel.	kg 1,4-DB equivalentes
RI-Radiación ionizante (Ionizing Radiation)	Refiere a los efectos dañinos sobre la salud producidos por descargas radiactivas.	Bq C-60 eq. al aire
ETM-Ecotoxicidad marina (Marine ecotoxicity)	Impacto toxicológico debido a la liberación en el medio marino de sustancias perniciosas al ecosistema.	kg 1,4-DB equivalentes
EUM-Eutrofización marina (Marine Eutrophication)	Crecimiento excesivo de la biomasa de algas y plantas en el medio marino. La degradación de la materia orgánica provoca un alto consumo de oxígeno.	kg N equivalente
ARM-Agotamiento de recursos minerales (Metal depletion)	Consumo de materiales extraídos de la naturaleza ya sean metales o rocas.	kg Cu equivalentes
AO-Agotamiento de la capa de ozono (Ozone depletion)	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono estratosférico.	kg de CFC-11 equivalentes
OF-Formación de oxidantes fotoquímicos (Photochemical oxidant formation)	Formación de ozono troposférico debido a la influencia de la radiación solar y a la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles y de CO en presencia de óxidos de nitrógeno (NOx). Provocan efectos nocivos sobre la biodiversidad y los materiales.	kg de NMVOC
DO-Destrucción de la capa de ozono (Stratospheric Ozone Depletion)	Degradación del ozono estratosférico por emisiones de sustancias que degradan la capa de ozono como gases de larga duración que contienen cloro y bromo.	kg CFC-11 equivalentes
AT-Acidificación terrestre (Terrestrial Acidification)	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo como consecuencia de la mineralización de gases (NOx, NH3 y SOx) que liberan iones de hidrógeno H+.	kg de SO ₂ equivalentes
ETT-Ecotoxicidad terrestre (Terrestrial ecotoxicity)	Impactos tóxicos nocivos que afectan al ecosistema, provocados por la liberación de sustancias con un efecto directo sobre la salud medioambiental.	kg 1,4-DB equivalente

*Donde NMVOC: Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, DB: diclorobenceno, CFC: clorofluorocarbonos, eq.: equivalentes

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la finalidad de comparar el impacto generado con las dos formas de cultivo a evaluar, a continuación, se van a detallar los impactos que genera cada una.

3.3 Evaluación del impacto

Los valores, en términos absolutos, del impacto ambiental para los escenarios de cultivo en abierto y cerrado se muestran en la tabla 5. En ella se recogen los resultados para cada categoría de impacto considerada en este estudio, así como la diferencia porcentual entre ambos escenarios considerando como UF 1 kg de lezna en base seca.

*Tabla 5. Resultados de la evaluación de impacto del cultivo de lezna para cada escenario.
UF: 1 kg de lezna en ms*

Categoría de impacto	Abierto	Cerrado	DIFERENCIA
Cambio climático (kg CO ₂ eq.)	4,64·10 ⁻¹	4,65·10 ⁻¹	0,22 %
Formación de partículas (kg PM2.5 eq.)	4,68·10 ⁻⁴	4,68·10 ⁻⁴	0,00 %
Agotamiento de recursos fósiles (kg oil eq.)	1,89·10 ⁻¹	1,90·10 ⁻¹	0,53 %
Consumo de agua dulce (m ³)	2,83·10 ⁻³	2,55·10 ⁻³	-10,98 %
Ecotoxicidad del agua dulce (kg 1,4 DB) eq.)	7,34·10 ⁻⁴	7,34·10 ⁻⁴	0,00 %
Eutrofización (kg P eq.)	2,01·10 ⁻⁵	2,01·10 ⁻⁵	0,00 %
Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq.)	6,75·10 ⁻²	6,75·10 ⁻²	0,00 %
Radiación ionizante (Bq C-60 eq. to air)	1,91·10 ⁻²	1,91·10 ⁻²	0,00 %
Ecotoxicidad marina (kg 1,4-DB eq.)	1,08·10 ⁻³	1,08·10 ⁻³	0,00 %
Eutrofización marina (kg N eq.)	7,35·10 ⁻⁶	7,36·10 ⁻⁶	0,14 %
Agotamiento de recursos minerales (kg Cu eq.)	1,45·10 ⁻¹	1,45·10 ⁻¹	0,00 %
Formación de oxidantes fotoquímicos (kg NO _x eq.)	7,71·10 ⁻⁴	7,72·10 ⁻⁴	0,13 %
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.)	1,62·10 ⁻⁷	1,62·10 ⁻⁷	0,00 %
Acidificación terrestre (kg SO ₂ eq.)	1,51·10 ⁻³	1,51·10 ⁻³	0,00 %
Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq.)	9,67·10 ⁻²	9,69·10 ⁻²	0,21 %

Tal como se puede apreciar en la Tabla 5, los impactos generados por ambos métodos de cultivo son, para la gran mayoría de categorías de impacto, prácticamente iguales. La única categoría cuyo impacto es significativamente mayor entre ambas es la que se refiere al consumo de agua dulce. La diferencia es en torno al 11% superior en el cultivo en abierto que con respecto al cultivo en cerrado, lo que se puede atribuir a que, pese a que el consumo de agua para reponer las pérdidas por evapotranspiración es el mismo, al ser el rendimiento del cultivo menor en el caso de cultivo en abierto, el consumo de agua por kg de lezna es mayor.

Anteriormente, en la definición del alcance del estudio (apartado 2.1.2) se propusieron dos UF para el estudio para así mejorar la interpretación de los resultados. La segunda UF considerada es 1 kg de proteína. Los datos relativos a esta UF se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la evaluación de impacto del cultivo de lemna para cada escenario.
UF: 1 kg de proteína de lemna

Categoría de impacto	Abierto	Cerrado
Cambio climático (kg CO ₂ eq.)	1,17	1,2
Formación de partículas (kg PM _{2.5} eq.)	1,21·10 ⁻³	1,21·10 ⁻³
Agotamiento de recursos fósiles (kg oil) eq.)	4,87·10 ⁻¹	4,90·10 ⁻¹
Consumo de agua dulce (m ³)	7,29·10 ⁻³	6,57·10 ⁻³
Ecotoxicidad del agua dulce (kg 1,4 DB eq.)	1,89·10 ⁻³	1,89·10 ⁻³
Eutrofización (kg P eq.)	5,18·10 ⁻⁵	5,18·10 ⁻⁵
Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq.)	1,74·10 ⁻¹	1,74·10 ⁻¹
Radiación ionizante (Bq C-60 eq. to air)	4,92·10 ⁻²	4,92·10 ⁻²
Ecotoxicidad marina (kg 1,4-DB eq.)	2,78·10 ⁻³	2,78·10 ⁻³
Eutrofización marina (kg N eq.)	1,89·10 ⁻⁵	1,90·10 ⁻⁵
Agotamiento de recursos minerales (kg Cu eq.)	3,74·10 ⁻¹	3,74·10 ⁻¹
Formación de oxidantes fotoquímicos (kg NO _x eq.)	1,99·10 ⁻³	1,99·10 ⁻³
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.)	4,18·10 ⁻⁷	4,18·10 ⁻⁷
Acidificación terrestre (kg SO ₂ eq.)	3,89·10 ⁻³	3,89·10 ⁻³
Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq.)	2,49·10 ⁻¹	2,50·10 ⁻¹

Al tratarse de una conversión, que depende del porcentaje de proteína del producto, la diferencia porcentual de un escenario u otro es la misma que se muestra en la tabla 5.

Los datos servirán para comparar con aquellos estudios que se centran en el impacto de la fracción proteica de la materia prima o el producto resultante de la transformación de esta. La comparación se detalla en el apartado 2.3.

3.3 Análisis de Contribución

Con el fin de interpretar los resultados de la evaluación de impactos se ha realizado un análisis de contribución que, como su nombre indica, pretende identificar la contribución de cada una de las etapas del ciclo de vida consideradas a cada categoría de impacto. Primeramente, se abordará el caso del cultivo en abierto y seguidamente el del cultivo en cerrado.

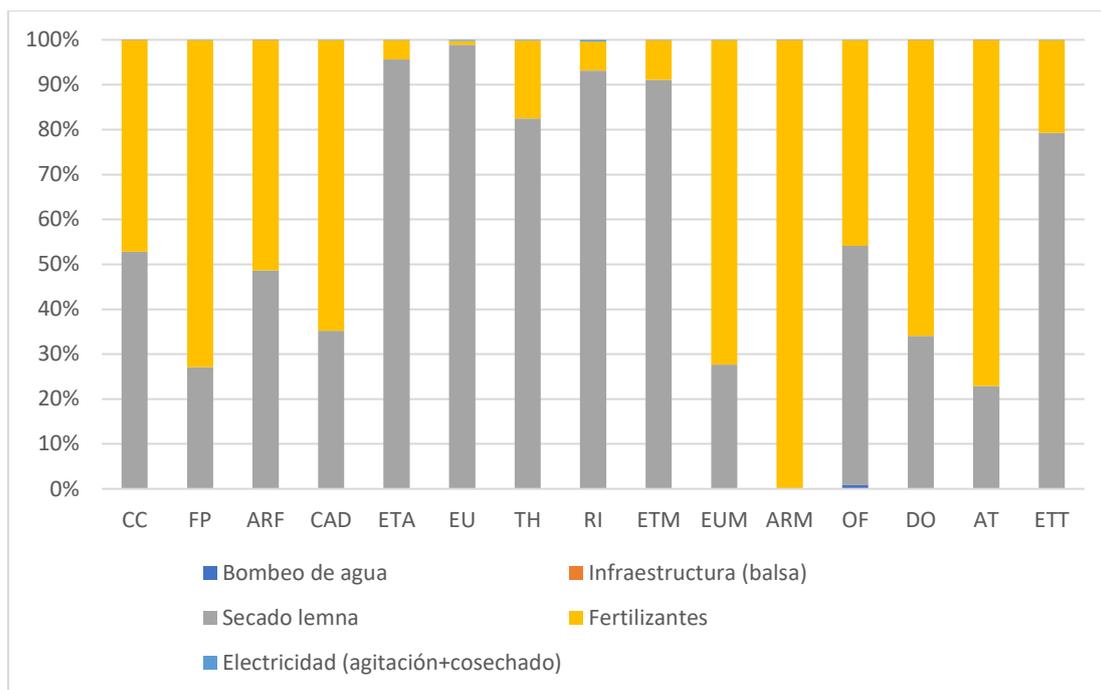


Figura 5. Análisis de la contribución a cada categoría de impacto de las distintas etapas para el cultivo en abierto.

Para el cultivo en abierto, como se puede apreciar en la Figura 5, el secado es el proceso que genera el mayor impacto para las categorías de ETA, EU, TH, RI, ETM y para ETT, cuyos valores suponen entre el 79 y el 99% del impacto total para dichas categorías. También el secado contribuye a aproximadamente el 50% del total en las categorías CC, OF y ARF, concretamente 51, 53 y 49% respectivamente. El impacto del secado se debe fundamentalmente al consumo de energía eléctrica y del gas natural. Entre estas dos fuentes de energía, el gas natural que se emplea para calentar el aire durante el proceso de secado de la leña supone la mayor contribución en las categorías de impacto estudiadas.

Respecto a la producción de fertilizantes destaca su contribución a las categorías FP, CAD, EUM y DO. Estos valores suponen en torno a dos terceras partes del impacto total generado, con valores que oscilan entre el 65% para UA y el 73% para FP. En menor medida, la contribución de esta etapa en las categorías CC, OF y ARF ronda el 46-51%, similar al generado por el proceso de secado. El elevado impacto de la producción de fertilizantes se debe principalmente al elevado consumo de energía requerido en dichos procesos. A efectos de facilitar la interpretación de los resultados sobre la contribución al impacto de los fertilizantes, y realizar una justificación más precisa, se ha representado en la figura 6 la contribución de la producción de cada uno de los fertilizantes utilizados en el cultivo al total de esta etapa para cada una de las categorías de impacto.

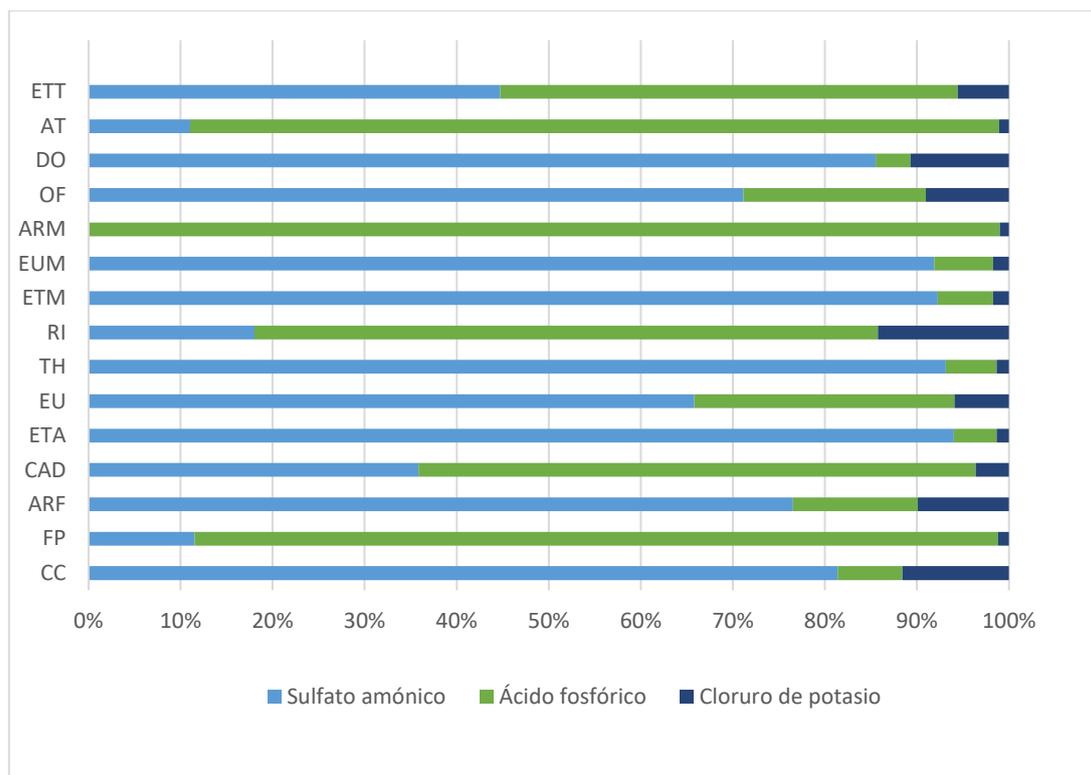


Figura 6. Contribución de cada fertilizante a la etapa de fabricación de fertilizantes.

Si analizamos más detenidamente el impacto generado por dichos fertilizantes, el que mayor impacto ejerce en las categorías CC, ARF, ETA, TH, EUM, OF y DO es el sulfato amónico con valores que van del 77 al 94%. También es el mayor responsable, con valores de 66 y 71% del total, de las categorías EU y OF respectivamente. El consumo energético más elevado para la producción del sulfato amónico y la aplicación de una dosis mayor que la de los otros fertilizantes justifica el efecto directo en dichas categorías. Por otra parte, el ácido fosfórico contribuye en mayor porción en las categorías FP, UA, RI y AT con valores del 61 al 87% de contribución al total. También en la categoría de ETT el ácido fosfórico es el que genera un 50% lo que supone el mismo valor que la suma del cloruro potásico (5%) y del sulfato amónico (45%). Cabe destacar, que en la categoría de ARM, el ácido fosfórico genera casi el 100% del impacto total de la producción de los fertilizantes. Esto es debido a la alta necesidad de materia prima ya que se extrae de roca mineral (roca fosfato), lo que supone un impacto relevante en cuanto al consumo de recursos minerales. Para la categoría de CAD, el impacto del ácido fosfórico es mayor al resto, todo y que se emplea tres veces menos cantidad (ver Tabla 3). Esto se debe a que la obtención de 1 kg de ácido fosfórico supone un consumo de agua 4 veces mayor que para los otros dos compuestos.

Para el cultivo en sistema cerrado, el ciclo de cultivo y posterior procesamiento de la leña es igual. La diferencia subyace, como se indicó anteriormente, en la incorporación de la infraestructura de cubierta del invernadero.

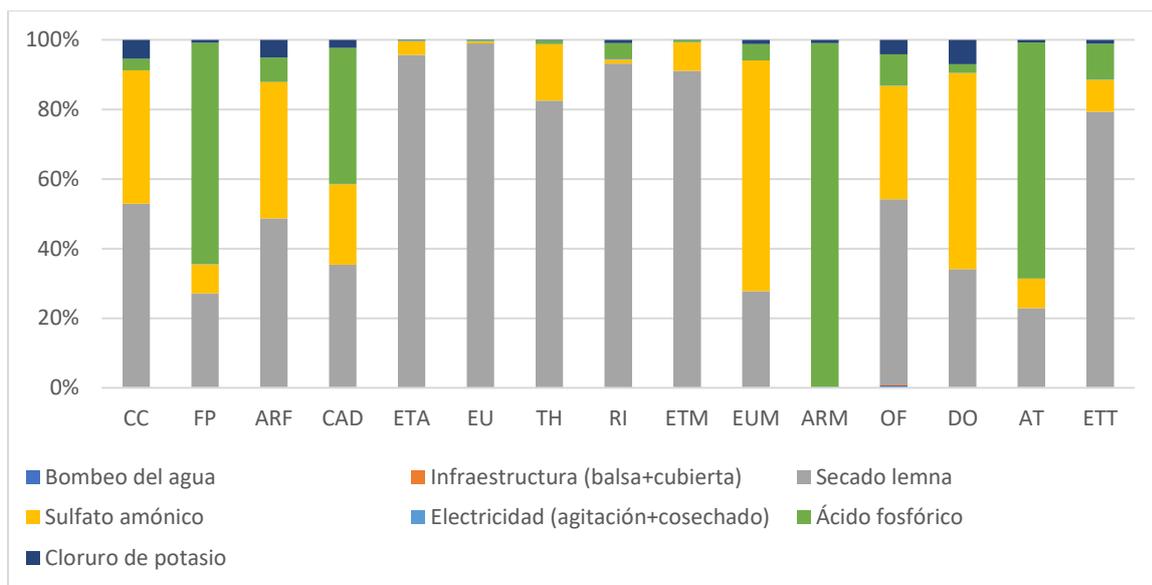


Figura 7. Impactos de las diferentes etapas para el sistema de cultivo cerrado.

Tal y como se puede observar en la Figura 7, la contribución de las distintas etapas consideradas a los impactos del cultivo en cerrado de lemna es prácticamente idéntica a la del cultivo en abierto. Pese a haberse incluido en este escenario la fabricación de los materiales necesarios para la infraestructura de la cubierta, al tratarse de un bien de larga duración, el impacto derivado de la estructura es casi imperceptible. Este hecho se debe a que la carga ambiental de la fabricación de dicha estructura se repartiría entre la producción de la biomasa durante todos los años de vida de la estructura.

En consonancia con lo anterior, como dato cabe destacar que, pese a que la estructura supone un leve impacto en el producto final, de los materiales que se emplean para la construcción del invernadero, los que ejercen un mayor impacto son el acero y el policarbonato (Figura 8).

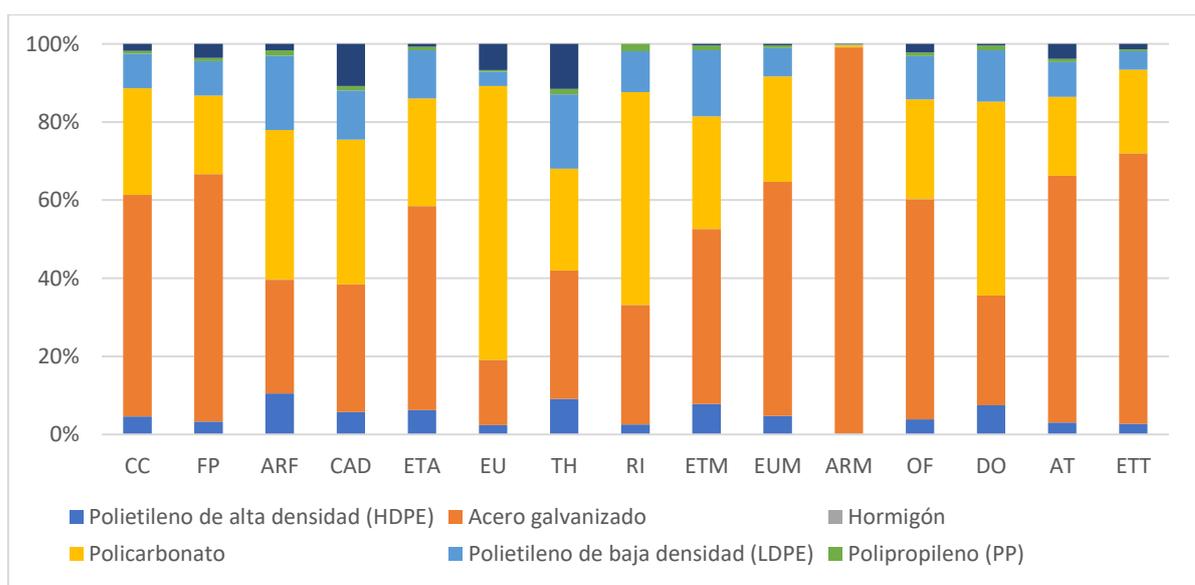


Figura 8. Impacto en porcentaje de cada componente de la estructura del invernadero según categoría de impacto.

3.4 Comparativa con otros estudios

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en este estudio con los resultados publicados en artículos científicos que abordan ACV de diferentes fuentes de proteína. De esta manera se pretende ofrecer una visión de cuan distan unas de otras las diferentes fuentes proteicas.

Así pues, las fuentes seleccionadas son las que actualmente presentan un mayor interés en la oferta proteica de origen vegetal. Estas son macroalgas, concentrado de proteína de haba y avena, quinua, soja y derivados como el tofu, micoproteínas, alfalfa y otras como hamburguesas a base de leguminosas. Para realizar la comparación se ha centrado el estudio en la categoría impacto calentamiento global (huella de carbono del producto). Se ha escogido esta categoría de impacto por ser el calentamiento global una preocupación ambiental de gran relevancia social y política. Además, esta categoría de impacto es la más evaluada en la bibliografía consultada, mientras que muy pocos estudios tienen también en cuenta otras categorías de impacto relevantes en la producción de alimentos como el consumo de agua o la eutrofización.

En la tabla 7 se presentan los resultados de la comparativa. En concreto, además del nombre del producto y la referencia bibliográfica, se presenta la unidad funcional utilizada en cada estudio, además de los límites del sistema aplicados y el contenido en proteína del producto. Para facilitar la interpretación, los datos relativos al impacto sobre el cambio climático se han ajustado a las unidades funcionales que se barajan en este trabajo, es decir, 1 kg de leña (m.s.) y 1 kg de proteína. Los resultados del presente estudio se sitúan en la primera fila de la tabla, para servir de referencia en la comparación con los demás resultados.

En referencia de las etapas que se incluyen en el ciclo de vida de los productos revisados, se pueden considerar diferentes límites del sistema; concretamente, los considerados en los artículos son:

- De la cuna a la puerta (Cradle to gate): toma en consideración desde la extracción y acondicionamiento de materias primas hasta el proceso productivo de la empresa.
- De la cuna a la tumba (Cradle to grave): estudia desde el acondicionamiento de las materias primas hasta la gestión última de los residuos (reciclaje u otros) incluyendo también la distribución y el consumo del producto.
- De la cuna al plato (Cradle to plate): Considera desde el acondicionamiento de las materias primas hasta la etapa previa al consumo, incluyendo la distribución hasta la llegada al consumidor.

Cabe señalar que, a partir de los resultados del análisis de contribución de las distintas etapas consideradas en cada estudio, el resultado final de la bibliografía consultada se ha modificado para tener siempre los valores de la huella de carbono considerando de la cuna a la puerta de la fábrica.

Tabla 7. Tabla comparativa de los resultados con las diferentes Fuentes bibliográficas.

PRODUCTO	LIMITES DEL SISTEMA	REFERENCIA	UF del estudio	% PROTEINA	CC (kg CO2 eq./kg m.s)	CC (kg CO2 eq./kg proteína)
Lemna	De la cuna a la puerta	este estudio	1 kg de lemna (m.s.) 1 kg de proteína	38 (m.s.)	0,46	1,20
1	Proteína aislada de soja	Berardy, et al. (2015)	1 kg de proteína aislada de soja (92% m.s.)	90 (m.s.)	21,2	24,4
2	Concentrado proteico avena/ haba (Vicia faba)	Hannele et al. (2019)	1 kg de concentrado proteico de avena	37	3,3	8,8
			1 kg concentrado proteico de haba	60	2,0-1,1	3,4-1,9
3	Hamburguesa de legumbres	Casson et al. (2019)	1 hamburguesa (100 g de producto. 56% m.s.)	7,42	8,4	63,34
5	Chlorella	Smetana et al. (2017)	1 kg de alimento en polvo 96% ms	55	8,4 ^a /55,1 ^b /140,4 ^c	14,7 ^a /96,1 ^b /245,1 ^c
	Spirulina			55	44,7 ^c /112,5 ^b	78,1 ^c /196,3 ^b
6	Quinoa	Cancino-Espinoza et al. (2018)	1 paquete de 500 g de quinoa en el lineal (87% m.s.)	13,6	0,9	5,76
7	Tofu	Mejia et al (2018)	1 kg de producto (21,5% m.s.)	10	3,11	6,68
	Micoproteínas	Smetana et al. (2015)	1 kg de producto	11,5	n.d.	5,33-5,78
8	Alfalfa	Gallego et al. (2011)	1000 kg de alfalfa deshidratada (11% humedad)	16,5	0,32	1,94

Donde: n.d: no disponible; a: Cultivo en reactor (fermentador heterótrofo); b: Cultivo en estanque abierto; c: Cultivo en reactor tubula

Se puede observar como la mayoría de las fuentes consultadas presentan una huella de carbono mayor con respecto a la fuente proteica analizada en este estudio. Hay que mencionar que ciertos productos como los aislados proteicos de soja, incluyen procesos de purificación muy complejos y con alto consumo de energía, lo que supone un aumento importante del impacto. Así, el concentrado de proteína de soja presenta una huella de carbono 45,7 veces mayor que la de la lezna por kg de materia seca. En el caso del tofu, que se obtiene también a partir de soja, pero cuyo procesado es menos intensivo en el uso de energía, el valor de huella de carbono obtenido en la bibliografía consultada es 6,7 veces mayor cuando se expresa por kg de materia seca. Los resultados para la Chlorella y la Spirulina muestran también la influencia del tipo de reactor utilizado para el cultivo de estas algas sobre el impacto, con valores muy elevados para el cultivo reactor tubular por el consumo de electricidad y los requerimientos de limpieza (Smetana et al., 2017).

La quinoa es uno de los productos que, de acuerdo a la bibliografía, presenta una baja huella de carbono, casi 2 veces mayor que la lezna. El único producto que presenta una huella de carbono menor es la alfalfa, siendo la huella de carbono de la lezna 1.6 veces mayor por kg de producto seco, pero, al ser evaluada con respecto a su contenido proteico, presenta un impacto 1.6 veces mayor que la lezna, esto se debe a que el contenido proteico de la lezna es más del doble que de la alfalfa.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos de la evaluación ambiental de la lemna, se extrae que el impacto derivado del proceso de secado supone la mayor fuente de impacto para todas las categorías evaluadas, seguida por la fabricación de los fertilizantes. El uso de energías alternativas para el secado podría suponer una disminución aún mayor del impacto derivado del cultivo y procesado de la lemna. Seguidamente, el uso de aguas eutrofizadas por purines u otras aguas ricas en nutrientes para el cultivo de la lemna, reduciría todavía más el impacto derivado del cultivo la lemna al no requerir o disminuir la necesidad de fertilizantes. No obstante, la lemna cultivada en dichos medios no se podrían destinar a alimentación humana.

La comparación de los impactos entre los dos sistemas de cultivo de la lemna, en abierto y cerrado, permite concluir que la construcción de una estructura para cubrir la balsa de cultivo apenas aumenta los valores de las categorías de impacto estudiadas, ya que se trata de un bien de larga duración. Además, el proceso cerrado supone un aumento del período de cultivo y del rendimiento, derivado de las condiciones mejor controladas de cultivo, lo que produce una disminución de alrededor del 11% en la categoría de consumo de agua dulce entre el cultivo en abierto y en cerrado.

En cuanto a la comparación de los resultados de este estudio con la bibliografía, hay que señalar que la lemna supone un menor impacto ambiental que las fuentes de proteína vegetal revisadas en cuanto a su contribución al cambio climático. No obstante, no se ha tenido en cuenta el valor biológico de la proteína. En este sentido, Berardy et al. (2019), presentan una metodología que incorpora la cantidad y calidad de la proteína por medio del análisis de la puntuación de los aminoácidos indispensables digeribles (DIAAS) para hacer comparaciones en ACV. Aun así, Appenroth et al., (2017), sitúan el perfil de aminoácidos de la lemna en valores similares a los recomendados por la OMS.

De los resultados obtenidos de la evaluación ambiental de la lemna, se concluye que, dadas las capacidades de crecimiento y características del cultivo, el impacto ambiental de la producción de lemna, en comparación con otras fuentes, presenta resultados muy favorables, lo que permite a la lemna posicionarse como una fuente proteica de bajo impacto. Futuras investigaciones deberían profundizar en posibles formas de presentación del producto, lo cual podría cambiar los valores de los impactos al incluir formas alternativas de procesado y envasado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, Z., Hossain, N. S., Hussain, S. G., & Khan, A. H. (1990). Effect of duckweed (*Lemna minor*) as complement to fertilizer nitrogen on the growth and yield of rice. *International journal of tropical agriculture*, 8(1), 72-79.
- AINIA. 2019. Comunicación personal. Proyecto LIFE LEMNA LIFE15 ENV/ES/000382.
- Anderson, K. E., Z. Lowman, A. M. Stomp and J. Chang (2011). "Duckweed as a feed ingredient in laying hen diets and its effect on egg production and composition." *International Journal of Poultry Science* 10(1): 4-7.
- Antón Vallejo, M. A. "Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo". Tesis doctoral, UPC, Departament de Projectes d'Enginyeria, 2004. Disponible a: <http://hdl.handle.net/2117/94137>
- Appenroth, K. J., Sree, K. S., Böhm, V., Hammann, S., Vetter, W., Leiterer, M., & Jahreis, G. (2017). Nutritional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food. *Food chemistry*, 217, 266-273.
- Armstrong, W. 2003. Wayne's Word Lemnaceae Online. Available from: <http://www.waynesword.palomar.edu>.
- Berardy, A., Costello, C., & Seager, T. (2015, May). Life cycle assessment of soy protein isolate. In *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Systems and Technologies*, Dearborn, MI, USA (pp. 18-20).
- Berardy, A., Johnston, C. S., Plukis, A., Vizcaino, M., & Wharton, C. (2019). Integrating Protein Quality and Quantity with Environmental Impacts in Life Cycle Assessment. *Sustainability*, 11(10), 2747.
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Kuhlmann, H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy*, 20:247–264.
- Cancino-Espinoza, Eduardo & Vázquez-Rowe, Ian & Quispe, Isabel. (2018). Organic quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) production in Peru: Environmental hotspots and food security considerations using Life Cycle
- Casson, A., Giovenzana, V., Beghi, R., Tugnolo, A., & Guidetti, R. (2019). Environmental Impact Evaluation of Legume-Based Burger and Meat Burger. In *International Conference on Engineering Future Food*.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064016.
- de Beukelaar, M. F., Zeinstra, G. G., Mes, J. J., & Fischer, A. R. (2019). Duckweed as human food. The influence of meal context and information on duckweed acceptability of Dutch consumers. *Food quality and preference*, 71, 76-86.
- Djekic, I., & Tomasevic, I. (2016). Environmental impacts of the meat chain—Current status and future perspectives. *Trends in food science & technology*, 54, 94-102.
- Duan, P., Chang, Z., Xu, Y., Bai, X., Wang, F., Zhang, L. (2013) "Hydrothermal processing of duckweed: Effect of reaction conditions on product distribution and composition". *Bioresource Technology*, 135, p. 710-719. Elsevier Ltd.

- Ekperusi, Abraham O., Francis D. Sikoki, and Eunice O. Nwachukwu. "Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: state and future perspective." *Chemosphere* (2019).
- EU Novel food catalogue (consultado en enero 2020). https://ec.europa.eu/food/safety/novel_food/catalogue/search/public/?event=home&seqfc e=197&ascii=L
- FAO, 2014. Consumption of meat & meat products <http://www.fao.org/ag/againfo/themes/en/meat/background.html> consultada en enero 2020
- FAO. "Protein and amino acid requirements in human nutrition". Report of a Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation. WHO Technical Report Series 935. 2007.
- Forero-Cantor, G., Ribal, J., & Sanjuán, N. (2020). Levying carbon footprint taxes on animal-sourced foods. A case study in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118668.
- Galán A. & Castroviejo, S.. (2006) *Lemna minor* L. (Real Jardín Botánico) Castroviejo & al. (eds.), *Flora ibérica* Vol. 18, Pag(s). 312-315. <http://www.rjb.csic.es/floraiberica/> <http://www.anthos.es>
- Gallego, A., Hospido, A., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2011). Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain. *Resources, conservation and recycling*, 55(11), 1005-1012.
- Ge, X., Zhang, N., Phillips, G. C., & Xu, J. (2012). Growing *Lemna minor* in agricultural wastewater and converting the duckweed biomass to ethanol. *Bioresource Technology*, 124, 485-488.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2008: a lifecycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (revised), Report I: Characterisation.
- Goopy, J. P. and P. J. Murray (2003). "A review on the role of duckweed in nutrient reclamation and as a source of animal feed." *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 16(2): 297-305.
- Halfdanarson, Jon & Koesling, Matthias & Kvalsheim, Nina & Emblemsvåg, Jan & Rebours, Celine. (2019). Configuring the Future Norwegian Macroalgae Industry Using Life Cycle Analysis. 10.1007/978-3-030-29996-5_15.
- Hannele, H., Taija, S., Nesli, S., Eemeli, H., Lisbeth, M., & Trydeman, K. M. (2019). Carbon footprint and land use of oat and faba bean protein concentrates using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 118376. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118376
- Informe del World Economic Forum "Meat: The Future Series - Alternative Proteins", escrito en Enero del 2019 sobre los beneficios medioambientales y para la salud sobre el consumo responsable de carne combinado con las fuentes de proteína alternativa. Consultado en noviembre del 2019.
- ISO 14040 (2006). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de Referencia. AEN/CTN 150 Gestión Medioambiental.
- Landolt, E., & Kandeler, R. 1987. Biosystematic investigations on the family of duckweeds (*Lemnaceae*) published in the *Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rübel, Zürich*.
- Leng, R. A. (1999). Duckweed: a tiny aquatic plant with enormous potential for agriculture and environment. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Animal Production and Health Paper, Rome, Italy. <http://www.fao.org/ag/againfo/resources/documents/DW/Dw2.htm>
- Linnaeus C. (1753). *Species plantarum*. Impensis Laurentii Salvii, Estocolmo, Suecia

- McMichael, A. J., Powles, J. W., Butler, C. D., & Uauy, R. (2007). Food, livestock production, energy, climate change, and health. *The Lancet*, 370(9594), 1253-1263.
- Mejia A, Harwatt H, Jaceldo-Siegl K, et al. 2018 Greenhouse gas emissions generated by tofu production: a case study. *J Hunger Environ Nutr* 13(1):131–142. doi: 10.1080/19320248.2017.1315323.
- Micha, R., Michas, G., & Mozaffarian, D. (2012). Unprocessed red and processed meats and risk of coronary artery disease and type 2 diabetes—an updated review of the evidence. *Current atherosclerosis reports*, 14(6), 515-524.
- Mkandawire, M., & Dudel, E. G. (2007). Are *Lemna* spp. effective phytoremediation agents. *Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability*, 1(1), 56-71.
- OMS. 1985. Necesidades de energía y de proteínas. Serie de Informes Técnicos N° 724. Ginebra.
- ONU. «Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible 2015». www.exteriores.gob.es. <https://undocs.org/es/A/RES/70/1> Consultado en septiembre de 2019.
- Posada, M.; Arroyave, M. (2006); Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales. *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia*. EIA: 6, 57-67.
- Rook, E. 2002. Flora, fauna, earth and sky. The natural history of the northwoods. Available from: www.rook.org/earl/bwca/nature/aquatics/lemna.html
- Talavera, S. *Lemna minor* L. (Ed. Ketres) Valdés B., Talavera, S., & Fernández-Galiano E. *Flora Vascular de Andalucía Occidental* Vol. 3, Pag(s). 211,212.
- Smetana, S., Mathys, A., Knoch, A., & Heinz, V. (2015). Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(9), 1254-1267.
- Smetana, S., Sandmann, M., Rohn, S., Pleissner, D., & Heinz, V. (2017). Autotrophic and heterotrophic microalgae and cyanobacteria cultivation for food and feed: life cycle assessment. *Bioresource technology*, 245, 162-170.
- Van der Spiegel, M., Noordam, M. Y., & Van der Fels-Klerx, H. J. (2013). Safety of novel protein sources (insects, microalgae, seaweed, duckweed, and rapeseed) and legislative aspects for their application in food and feed production. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 12(6), 662-678.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230.
- WHO/FAO/UNU (World Health Organization/Food and Agriculture Organization of the United Nations/United Nations University), 2007. Protein and amino acid requirements in human nutrition. Report of a Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation. WHO Technical Report Series, No 935, 284 pp.
- Zhao X., Elliston A., Collins S.R.A., Moates G.K., Coleman M.J., Waldron K.W. (2012) “Enzymatic saccharification of duckweed (*Lemna minor*) biomass without thermophysical pretreatment”. *Biomass and Bioenergy*, 47, p. 354–361. Elsevier Ltd.