

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Perfil Ambiental de la Biorrefinería PHENOLEXA

El Estudio de Impacto Ambiental y el
Análisis de Ciclo de Vida como ejemplo
de promoción de prácticas sostenibles
en proyectos.



CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Autor Principal: Silvia Gómez Valle (Fundación Cartif)

Otros autores: Laura Pablos (Fundación Cartif); Esther San José (Fundación Cartif); José María Sanz (Fundación Cartif); Raúl Sánchez (Fundación Cartif)

ÍNDICE

1. Título
2. Resumen
3. Introducción
4. Estudio de Impacto Ambiental
5. El Análisis Ciclo de Vida en PHENOLEXA
6. Conclusiones
7. Bibliografía

1. TÍTULO

Perfil Ambiental de la Biorrefinería PHENOLEXA:

El Estudio de Impacto Ambiental y el Análisis de Ciclo de Vida como ejemplo de promoción de prácticas sostenibles en proyectos.

2. RESUMEN

Tanto un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) como un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) tienen como objetivo evaluar y minimizar los efectos negativos en el medio ambiente. Ambos emplean metodologías sistemáticas para identificar y cuantificar impactos ambientales, y buscan promover prácticas sostenibles y responsables en el desarrollo de proyectos y productos. Proporcionan por tanto una evaluación ambiental holística que puede mejorar la sostenibilidad y aceptación de un proyecto. Bajo esta premisa ambas se incorporaron en el desarrollo del Proyecto [PHENOLEXA](#) (GA 101023225), el cual se centró en la creación de una tecnología de base para el desarrollo de una biorrefinería sostenible para obtener compuestos polifenólicos a partir de cuatro cultivos: cebolla, olivo, vid y achicoria.

El EsIA se centró en analizar las mejores prácticas de uso de residuos, comparando la utilización de los residuos mencionados en la biorrefinería PHENOLEXA con las prácticas habituales de agricultores y productores. Para ello, se examinaron varios aspectos de cada tipo de residuo: actores clave, puntos clave, costes y maquinaria necesaria, procedimientos, participantes implicados, requisitos energéticos e impactos medioambientales. Se estableció un ranking de mejores prácticas, sobre el cual se realizó un análisis de eficacia y daño ambiental mediante la adaptación de la metodología de evaluación multicriterio propuesta por Conesa (1997). Las variables analizadas incluyeron: atmósfera, suelo, agua, medio biótico, entorno perceptivo y entorno socioeconómico.

Esta evaluación dio como resultado recomendaciones en formato de guías sobre la incorporación, transformación y mejor uso de los residuos agrícolas en la biorrefinería.

El objetivo del perfil ambiental calculado en el proyecto PHENOLEXA, a partir de la metodología de ACV *ex-ante*, fue cuantificar los impactos de uno de los procesos de biorrefinería desarrollados: el proceso que utiliza un disolvente NADES (Natural Deep Eutectic Solvent) para la extracción y emplea residuos de piel de cebolla roja como materia prima. Durante el desarrollo del proyecto, se determinó que este residuo contenía la mayor concentración de polifenoles, independientemente de la técnica de extracción o los pretratamientos aplicados, por ello se eligió como materia prima de referencia.

Para esta evaluación se adoptó una perspectiva "*de la cuna a la puerta de la biorrefinería*" abarcando todos los procesos unitarios que conformaron esa cadena de valor, desde el suministro del residuo agrícola hasta la extracción final de los polifenoles en la biorrefinería.

Los resultados mostraron que la etapa de preparación de los disolventes NADES es el principal punto crítico ambiental, debido a los métodos de calentamiento y agitación intensivos en energía utilizados en su preparación, lo que resulta en mayores emisiones de CO₂ equivalente por gramo de polifenol obtenido. Integrar fuentes de energía renovable en esta etapa ofrecería, por tanto, un camino prometedor para reducir la huella ambiental de este proceso.

3. INTRODUCCIÓN

Europa genera anualmente cerca de 400 millones de toneladas de residuos agrícolas secos, y el objetivo del proyecto PHENOLEXA ha sido maximizar el aprovechamiento de esta biomasa residual que, a menudo, se utiliza para aplicaciones de bajo valor como compost o piensos.

El proyecto PHENOLEXA ha diseñado una tecnología de base para el desarrollo de una biorrefinería en cascada inocua y respetuosa con el medio ambiente, destinada a convertir flujos secundarios agroalimentarios en bioactivos polifenólicos de alto valor y fibras funcionales, que pudieran tener aplicación en las industrias farmacéutica, cosmética, nutracéutica y alimentaria.

El proyecto se centró en la valorización de cuatro tipos de residuos: restos de poda y hojas de olivos y viñedos, cascara de cebolla (amarilla y roja) y raíces y hojas de achicoria. Durante su ejecución se estudió una gama de tecnologías de pretratamiento, incluyendo ultrasonidos, campos eléctricos pulsados y pretratamientos microbianos, además de innovadores métodos de extracción con disolventes eutécticos naturales y profundos (NADES) y agua subcrítica, con los que se llevaron a cabo diferentes tipos de extracciones para preservar y mejorar la funcionalidad de los compuestos bioactivos polifenólicos con propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antifúngicas y antiinflamatorias.

El proyecto también incluyó la validación industrial de los productos extraídos mediante la creación de prototipos a escala de laboratorio y su prueba en sectores clave como el farmacéutico, nutracéutico, cosmético y alimentario.

A lo largo de tres años, los 12 socios del consorcio PHENOLEXA han demostrado la viabilidad tecnoeconómica de los procesos analizados y han sentado las bases para que, en un futuro próximo, la extracción con disolventes NADES pueda consolidarse como una alternativa ambientalmente favorable para la extracción de polifenoles a partir de residuos agrícolas.

4. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

Definición y metodología

Definición

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en el marco del proyecto PHENOLEXA se ha orientado a evaluar las mejores prácticas en la gestión de residuos agrícolas, comparando su uso en la biorrefinería PHENOLEXA con las prácticas convencionales empleadas por agricultores y productores en Europa. El objetivo principal de este análisis es identificar las prácticas más efectivas y sostenibles para la gestión de residuos provenientes de cultivos específicos (cebolla, achicoria, olivo y viñedo), y desarrollar recomendaciones que permitan optimizar el uso de estos residuos en la biorrefinería.

Este análisis abarca diferentes aspectos de cada tipo de residuo: actores clave involucrados, puntos críticos en la gestión, costos y maquinaria necesaria, procedimientos operativos, requisitos energéticos, impactos medioambientales y participantes implicados en cada etapa del proceso. A partir de estos datos, se ha establecido un ranking de las mejores prácticas, el cual se evaluó mediante una adaptación de la metodología de evaluación multicriterio propuesta por (Conesa,1997).

Metodología de Evaluación

La metodología utilizada para este estudio se basa en un sistema de evaluación multicriterio que examina la eficacia y la carga ambiental de cada una de las prácticas de manejo de residuos. Las variables analizadas incluyeron aspectos como atmósfera, suelo, agua, medio biótico, entorno perceptivo y entorno socioeconómico, a su vez divididos en varios factores.

Cuadro 1. Variables y factores de la evaluación multicriterio

ATMÓSFERA	Calidad acústica: La calidad del ruido se refiere al cambio con respecto a las condiciones normales cuando ocurren ruidos y/o vibraciones debido a la actividad en consideración. Este factor también depende del receptor, por ejemplo, la proximidad a áreas residenciales.
	Calidad físico-química: Bajo este factor, se consideran los impactos potenciales en la calidad química y física de la atmósfera. Esto incluye las emisiones de gases contaminantes que afectan la calidad química, o los gases de efecto invernadero (como el CO ₂) que afectan las características físicas de la atmósfera. También se consideran las emisiones de partículas de varios tamaños.
SUELO	Propiedades físicas: Este factor se refiere a los cambios en las propiedades físicas del suelo, es decir, porosidad, cantidad de agua, estructura del suelo, densidad del suelo, etc..
	Propiedades químicas: Se considera la liberación de contaminantes en el suelo o el medio del suelo, como nitratos, metales, etc.
AGUA	Superficial: Cambios en la calidad físico-química de las aguas superficiales (ríos, lagos, arroyos, etc.) debido a derrames de petróleo, cambios en el pH, temperatura, sólidos en suspensión, etc.
	Subterránea: Cambios en la calidad físico-química de las aguas subterráneas debido a derrames de petróleo, cambios en el pH, temperatura, sólidos en suspensión, etc.

CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

MEDIO BIÓTICO	Vegetación: Cambios en la diversidad y abundancia de especies de plantas, así como cambios en la salud y desarrollo normal de las plantas.
	Fauna: Cambios en la diversidad y abundancia de especies de fauna, así como cambios en la salud y desarrollo normal de los animales.
MEDIO PERCEPTUAL	Impacto visual: Este factor considera los cambios en el paisaje debido a la presencia de elementos visibles desde la distancia, cambios en la morfología, color o elementos fragmentadores del paisaje.
	Elementos singulares: Se consideran elementos singulares la presencia de elementos visibles del patrimonio natural o cultural, que podrían verse afectados por la actividad en consideración. Dado que el análisis se realiza en términos generales y no está relacionado con una ubicación específica, no es posible establecer un efecto sobre este elemento.
MEDIO SOCIOECONÓMICO	Economía: Este factor evalúa los impactos potenciales que cada actividad tiene en la economía. Los principales impactos están relacionados con el empleo, pero también con posibles daños o pérdidas económicas, inversiones, etc.
	Salud y bienestar: Este factor se refiere al entorno social, su bienestar y seguridad.

Fuente: Adaptación desarrollada por CARTIF de la metodología Conesa (1997).

La asignación de impactos se realiza de manera semicualitativa, siguiendo criterios de caracterización estandarizados. Para cada factor, se analiza el impacto de las actividades incluidas en las prácticas evaluadas. Aunque la evaluación es cualitativa, se asigna un grado de relevancia al impacto basado en diferentes aspectos.

Cuadro 2. Evaluación y clasificación de los impactos.

Tipo de impacto (+/-)	+	-	[Vacío]		
Refleja el carácter del impacto en el MA	Impacto beneficioso <i>Mejora el medio ambiente</i>	Impacto perjudicial <i>Causa degradación o daño al MA</i>	Sin impacto <i>No se detecta impacto</i>		
Intensidad (IN)	1	3	6	9	12
Incidencia de la acción sobre el factor ambiental.	Impacto bajo <i>Modificación mínima</i>	Impacto medio <i>Grado medio de alteración</i>	Impacto alto <i>Perturbación significativa</i>	Impacto muy alto <i>Destrucción casi total</i>	Impacto total <i>Destrucción total</i>
Extensión (EX)	1	3	6	9	12
Extensión afectada por la implementación del proyecto.	Puntual <i>La acción produce efecto muy localizado</i>	Parcial <i>Efecto con incidencia notable en el MA</i>	Amplio o grande <i>Efecto detectado en buena parte del área en estudio</i>	Total <i>Efecto generalizado en todo el MA</i>	Localización crítica <i>Efecto crítico para el MA</i>
Momento (MO)	1	2	3	4	8
Tiempo transcurrido entre el impacto y el primer registro del efecto sobre el factor ambiental.	Largo plazo <i>Manifestación superior a 10 años</i>	Medio plazo <i>Manifestación entre 1 y 10 años</i>	Corto plazo <i>Manifestación inferior a un año</i>	Inmediato <i>Tiempo entre acción y manifestación prácticamente nulo</i>	Crítico <i>Acción impactante crítica. Sin influencia del momento en que aparezca</i>

CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Persistencia (PE)	1	2	3	4	5
Tiempo que dura el efecto sobre el medio ambiente.	Efímero <i>Duración mínima</i>	Momentáneo <i>< 1 año</i>	Temporal <i>1 - 10 años, independientemente de la acción</i>	Persistente <i>11 - 15 años</i>	Permanente <i>Efecto continuo durante más de 15 años</i>
Sinergia (SY)	1	2	4		
Incremento del efecto al actuar 2 o más causas juntas	Simple <i>Su interacción no produce efectos sinérgicos</i>	Moderada <i>Su interacción produce sinergia media o baja</i>	Significativa <i>Su interacción es bastante sinérgica</i>		
Acumulación (AC)	1	4			
Progresión de la manifestación del efecto si la acción persiste repetidamente.	Simple <i>Efectos individualizados, no induce nuevos efectos</i>	Acumulativa <i>La acción continuada aumenta la magnitud del efecto</i>			
Efecto (EF)	1	4			
Manifestación de un efecto como consecuencia de una acción (temporal y geográficamente).	Directo <i>Acción y efecto ocurren en el mismo tiempo y lugar</i>	Indirecto <i>Los efectos ocurren más tarde o en otro lugar</i>			
Frecuencia (FR)	1	2	4		
Frecuencia con la que se manifiesta un efecto dado.	Irregular <i>Manifestación repetida sin patrón regular</i>	Periódico <i>Manifestación en ciclos regulares</i>	Continuo <i>Manifestación constante</i>		
Recuperabilidad (MC)		1	2	3	4
Este criterio se refiere a la capacidad de recuperar el estado original después de un impacto dado, mediante la intervención humana.	RECUPERABLE <i>Neutralizados en menos de un año con medidas correctivas</i>	Inmediato <i>Neutralizado en menos de 1 mes</i>	Corto plazo <i>Neutralizado en menos de 1 año</i>	Medio plazo <i>Neutralizado entre 1 y 10 años</i>	Largo plazo <i>Neutralizado entre 11 y 15 años</i>
	5	6	8		
	MITIGABLE <i>La alteración puede mitigarse con medidas correctivas</i>	COMPENSABLE <i>La alteración puede mitigarse compensando los efectos negativos</i>	IRRECUPERABLE <i>Reparación total poco probable. Neutralización más de 15 años</i>		

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

IMPORTANCIA (I)	25	50	75	100	
	Bajo	Moderado	Grave	Crítico	
$I = +/-$ (3IN+2EX+MO+PE+RV+S Y+AC+EF+FR+MC)	Impacto irrelevante en comparación con los objetivos de la actividad	Impacto significativo. No requiere medidas correctivas o protectoras intensivas	Requiere restauración correctiva o protectora. Necesario tiempo de recuperación	El impacto supera el umbral aceptable. No hay recuperación, solo compensación	
	Positivo	Bajo	Moderado	Grave	Crítico

Estudio de las prácticas actuales de gestión de residuos

Para llevar a cabo el estudio de impacto ambiental de las prácticas de gestión de residuos dentro del proyecto PHENOLEXA, se siguió un enfoque en varias etapas. En primer lugar, se realizó un análisis exhaustivo de las prácticas más comunes para cada tipo de residuo. Luego, se aplicó la metodología previamente descrita para evaluar los impactos de cada uno de los puntos críticos de las prácticas más habituales. Para finalmente poder dar recomendaciones de uso para cada residuo, incluyendo el punto específico en la cadena de producción del residuo en el que debía intervenir la biorrefinería PHENOLEXA. La evaluación se centró en cuatro cultivos clave: cebolla, achicoria, olivo y viñedo.

Revisión de las Prácticas Actuales de Gestión de Residuos Agrícolas

El primer paso del estudio, fue realizar una revisión exhaustiva de las soluciones actualmente utilizadas por los agricultores para la gestión de los residuos enmarcados en el proyecto con el objetivo de identificar las mejores prácticas. Destacando los actores involucrados, los costes estimados, los retos asociados a cada práctica y la utilidad de los mismos dentro de la biorrefinería.

Cebolla

La UE produce aproximadamente 6,99 millones de toneladas de cebolla, de las cuales España y los Países Bajos son los mayores productores, seguidos de Francia, Alemania y Polonia (Sharma, K., 2016).

La gestión de los residuos de cebolla, representan más de 500.000 toneladas de residuos anuales, entorno al 7,6% de la producción. Se ha identificado que la mayor parte del residuo se genera en los centros de clasificación y procesamiento y se incluyen pieles, raíces y cebollas descartadas por no cumplir con los estándares de calidad (Oldershaw, X., 2021).

CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Actores principales: agricultores, centros de almacenamiento, y la industria alimentaria que utiliza cebolla como ingrediente en productos procesados.

Costes estimados: Los costos de producción de cebolla se estiman entre 10.000 y 12.000 euros por hectárea, con un rendimiento promedio de 60-70 toneladas por hectárea. El costo del transporte y carga de residuos es de 2.500-3.500 euros por hectárea.

Prácticas Actuales: Actualmente, los residuos de cebolla suelen terminar en vertederos. Las prácticas tradicionales, como el compostaje, no son adecuadas debido a la presencia de compuestos de azufre que pueden generar malos olores y acidificar el compost. Además, se desaconseja su uso como fertilizante orgánico debido al desarrollo de agentes fitopatogénicos.

Utilidad en la biorrefinería PHENOLEXA: los residuos de cebolla pueden ser valorizados para la obtención de compuestos funcionales de alto valor añadido, como flavonoides y fibras dietéticas.

Recomendación: Se propone una recolección y tratamiento de estos residuos en plantas de procesamiento dedicadas, evitando su deposición en vertederos. Aprovechando los compuestos bioactivos valiosos presentes en las capas exteriores de la cebolla dentro de la biorrefinería para la producción de bioproductos

Achicoria

La achicoria es ampliamente cultivada en Europa, especialmente en Francia, Bélgica y los Países Bajos, con una producción anual de más de 690,000 toneladas. Existen varias variedades de achicoria, como la achicoria de raíz (usada para la extracción de inulina y como sustituto del café) y otras variedades de achicoria para ensalada (como endivia o escarola).

Este cultivo genera una gran cantidad de residuos, sobre todo en la producción de inulina siendo principalmente hojas y raíces, que están empezando a valorizarse para aplicaciones en la industria alimentaria y bioplásticos

Actores principales: Agricultores, industrias productoras de inulina y productores de achicoria para consumo fresco.

Costos estimados: El costo de la recolección de residuos de achicoria es de aproximadamente 225-244 euros por hectárea.

Prácticas Actuales: El manejo de los residuos generados en el cultivo de achicoria suele incluir la cobertura vegetal o su uso como abono verde, distribuyéndolos en el campo tras la cosecha. Si bien esta práctica ayuda a mejorar las propiedades físicas del suelo, puede no ser la opción más eficiente cuando se producen grandes cantidades de residuos que no pueden gestionarse localmente. Además, no todo el residuo es aprovechado de manera óptima.

Utilidad en la biorrefinería PHENOLEXA: Se recomienda la recuperación del excedente de residuos para su uso en la biorrefinería PHENOLEXA para obtener compuestos como la inulina, utilizada en la industria alimentaria y cosmética.

Práctica recomendada: Incorporar los residuos sobrantes no utilizados en el suelo como fertilizante en la biorrefinería para la extracción de compuestos bioactivos.

CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Olivo

El olivar es uno de los cultivos más importantes en Europa, especialmente en España, Italia y Grecia, donde se producen más de 12 millones de toneladas de aceitunas anualmente (Eurostat, 2022). La poda de los olivos genera una gran cantidad de residuos, compuestos principalmente por ramas y hojas.

Actores principales: Agricultores, cooperativas de productores de aceite de oliva, y la industria de la madera.

Costos y requerimientos: Se estima que la poda de olivos genera un promedio de 2,5 toneladas por hectárea de residuos (Zabaniotou, A., 2015). El costo de transporte y trituración de los residuos es de 36,30 euros por hora o 18,71 euros por hectárea.

Prácticas Actuales: Las prácticas más comunes para la gestión de los residuos de poda incluyen el mulching y la quema en campo. Si bien el mulching contribuye a mejorar las condiciones del suelo, la quema de residuos genera emisiones de gases de efecto invernadero y representa un riesgo de incendios secundarios.

Utilidad en la biorrefinería PHENOLEXA: La biorrefinería PHENOLEXA puede aprovechar estos residuos para producir energía o biomateriales.

Prácticas recomendadas: Se sugiere la recolección de los residuos de poda para su aprovechamiento en la producción de pellets o su uso directo en la biorrefinería. La recolección podría llevarse a cabo tras la poda de formación, antes de que los residuos sean quemados o integrados al suelo.

Viñedo

El viñedo es otra fuente significativa de residuos agrícolas en Europa, con una producción anual de más de 26 millones de toneladas de uvas y 1,7 Tm de residuos de poda al año por hectárea (Fernández, O., 2020). Los residuos de poda de viñedos son generalmente quemados o triturados para su reincorporación al suelo.

Actores principales: Grandes productores de vino, cooperativas agrícolas, y pequeñas explotaciones familiares.

Costos estimados: El costo total de producción de uvas se estima en aproximadamente 3.854€ por hectárea. La trituración de los residuos cuesta alrededor de 14,60 € por hora o 11,80 € por hectárea.

Prácticas Actuales: La quema de los residuos de poda de viñedo es una práctica común, aunque ambientalmente dañina debido a la liberación de gases de efecto invernadero. También se utiliza el mulching en algunas explotaciones, pero con una gestión limitada en cuanto a la eficiencia del uso de los residuos.

Utilidad en la biorrefinería PHENOLEXA: La biorrefinería puede aprovechar estos residuos para la producción de pellets o biocombustibles y también para la extracción de bioproductos.

Prácticas recomendadas: Recoger los residuos apilados antes de su quema o trituración y destinarlos a la producción de compuestos bioactivos en la biorrefinería.

Resultado del Impacto Ambiental de las prácticas actuales de gestión de residuos

Tras el análisis realizado, se identificaron las cuatro prácticas más habituales en la gestión de residuos agrícolas: cobertura vegetal o mulching, quema en campo, peletización y vertido en vertederos. Para cada una de estas prácticas, se procedió a identificar los puntos clave del proceso y se aplicó la evaluación multicriterio con el objetivo de comparar su impacto ambiental. Este análisis permitió mostrar de manera integral la eficiencia y sostenibilidad de cada técnica.

En los siguientes apartados, se presenta la puntuación global de los impactos asociados a los procesos de gestión de residuos, acompañada de una matriz que detalla los impactos en cada uno de los factores evaluados. Además, se incluyen los puntos clave del proceso, analizando tanto sus impactos individuales como su repercusión global en la sostenibilidad del sistema de gestión. Finalmente, se incorporan gráficos que permiten una evaluación visual comparativa de estos procesos, facilitando la comprensión de los resultados y las conclusiones derivadas del estudio.

Cobertura vegetal

Esta práctica se utiliza para residuos de poda de olivo, viñedo y hojas de achicoria, incorporando estos residuos al suelo para mejorar sus propiedades físicas y químicas beneficiando la estructura y fertilidad del suelo. Los impactos detectados son en su mayoría positivos, destacando la mejora de la estructura del suelo. Sin embargo, los impactos negativos, aunque bajos, están relacionados con el uso de maquinaria agrícola que emite gases de efecto invernadero y genera ruido, afectando la calidad del aire local y el entorno acústico. En general, el balance de impactos es positivo, con beneficios significativos a nivel del suelo.

A continuación, se muestra el Cuadro 3 que resume los impactos globales detectados y también el 4, relacionado con los impactos por actividades y factores, además de las gráficas resultantes de la evaluación (Figura 1).

Cuadro 3. Resumen de impactos de la cobertura vegetal

Positivo	Bajo	Moderado	Grave	Crítico
Total: 0	Total: 5	Total: 13	Total: 0	Total: 0
Impacto positivo	Impacto irrelevante en comparación con los objetivos de la actividad	Impacto significativo. No requiere medidas correctivas o protectoras intensivas	Requiere restauración correctiva o protectora. Necesario tiempo de recuperación	El impacto supera el umbral aceptable. No hay recuperación, solo compensación

Cuadro 4. Matriz de impactos y factores ambientales de la cobertura vegetal

Entorno		Cobertura vegetal		
Factor		Manejo en campo		
		Poda manual	Triturado	Mezcla e incorporación
ATMOSFERA	Cal. acústica		Bajo	Bajo
	Cal. físico-química		Moderado	Moderado
SUELO	Prop. físicas		Bajo	Positivo
	Prop. químicas			Positivo
AGUA	Superficial			
	Subterránea			
MEDIO BIÓTICO	Vegetación			Positivo
	Fauna		Bajo	Bajo
MEDIO PERCEPTUAL	Impacto visual			
	Elem. singulares			
MEDIO SOCIOECONÓMICO	Economía			Positivo
	Salud y bienestar			

0	0	4
0	3	2
0	1	1
0	0	0
0	0	0

Positivo
Bajo
Moderado
Grave
Crítico

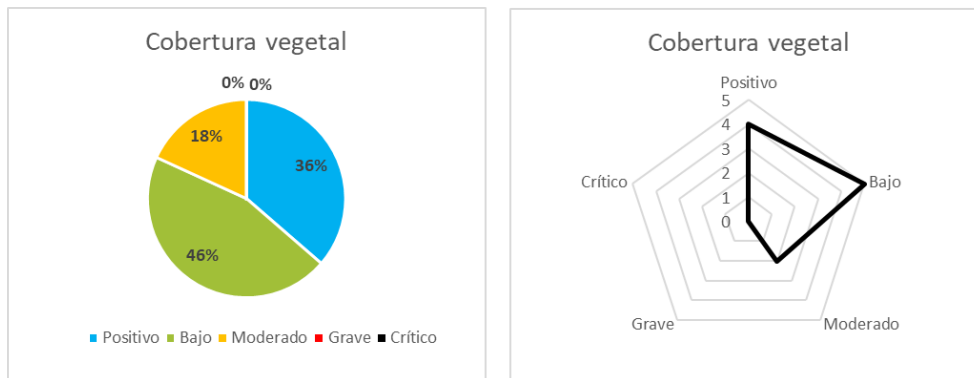


Figura 1. Gráficas de los impactos producidos por la práctica de cobertura vegetal

CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Quema en campo

Esta práctica se refiere a la quema de residuos agrícolas en el campo, especialmente de podas de viñedo y olivo. A pesar de ser una opción económica y de fácil aplicación, la quema de residuos en campo genera impactos negativos de moderados a severos. Las emisiones de CO₂, metano y otras partículas contribuyen al cambio climático y degradan la calidad del aire, afectando la atmósfera y la salud humana. Además, existe un alto riesgo de incendios accidentales. Aunque esta práctica es eficiente en términos de eliminación de residuos, los impactos sobre la atmósfera y la biodiversidad son generalmente negativos y de importancia moderada - alta.

Seguidamente, se presenta una tabla que sintetiza los impactos globales identificados (Cuadro 5), así como los impactos asociados a actividades y factores específicos (Cuadro 6), además de la Figura 2 con las gráficas finales de evaluación de los impactos.

Cuadro 5. Resumen de impactos de la quema en campo

Positivo	Bajo	Moderado	Grave	Crítico
Total: 0	Total: 10	Total: 5	Total: 1	Total: 0
Impacto positivo	Impacto irrelevante en comparación con los objetivos de la actividad	Impacto significativo. No requiere medidas correctivas o protectoras intensivas	Requiere restauración correctiva o protectora. Necesario tiempo de recuperación	El impacto supera el umbral aceptable. No hay recuperación, solo compensación

Cuadro 6. Matriz de impactos y factores ambientales de la quema en campo

Entorno	Factor	Quema en campo			
		Manejo en campo en campo		Recolección y tratamiento	
		Poda manual	Recogida mecánica	Estaquillado	Quema
ATMOSFERA	Cal. acústica		Bajo	Bajo	
	Cal. físico-química		Moderado	Moderado	Grave
SUELO	Prop. físicas		Moderado	Bajo	Moderado
	Prop. químicas				
AGUA	Superficial				Bajo
	Subterránea				
MEDIO BIÓTICO	Vegetación				Bajo
	Fauna		Bajo		Bajo
MEDIO PERCEPTUAL	Impacto visual			Bajo	Moderado
	Elem. singulares				
MEDIO SOCIOECONÓMICO	Economía				Bajo
	Salud y bienestar				Bajo

	Positivo	Bajo	Moderado	Grave	Crítico
0	0	0	0	0	0
0	0	2	3	5	0
0	0	2	1	2	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0

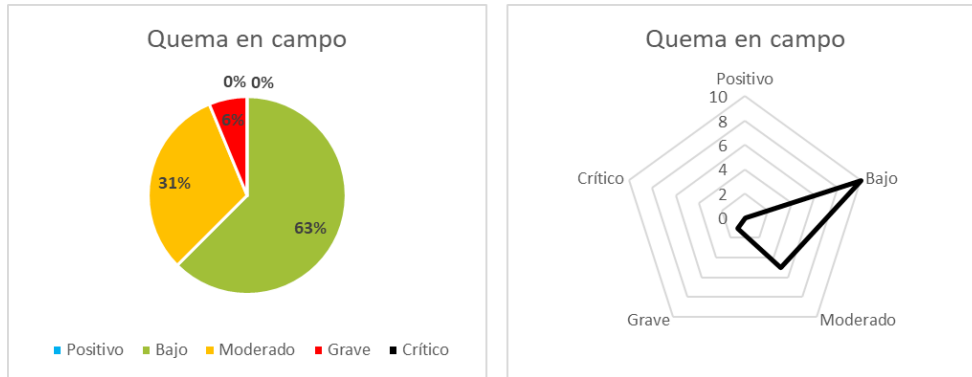


Figura 2. Gráficas de los impactos producidos por la práctica de quema en campo

Peletizado

La peletización consiste en transformar residuos de poda en pellets para su uso energético. Es una práctica con un impacto económico positivo, ya que permite reutilizar los residuos como fuente de energía, sin embargo, durante el proceso de combustión, se emiten gases de efecto invernadero, como CO₂, lo que genera un impacto negativo considerable en la atmósfera. A nivel socioeconómico, los beneficios incluyen la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la creación de nuevas oportunidades de empleo. El impacto global en el suelo y el agua es bajo, pero los efectos en la calidad del aire van de moderados a severos.

En las siguientes tablas y figuras se presenta un resumen de los impactos globales detectados (Cuadro 7), así como un desglose detallado de los impactos divididos por actividades y factores (Cuadro 8), acompañado de las gráficas que resultan de la evaluación realizada (Figura 3).

Cuadro 7. Resumen de impactos de la peletización

Positivo	Bajo	Moderado	Grave	Crítico
Total: 3	Total: 17	Total: 27	Total: 1	Total: 0
Impacto positivo	Impacto irrelevante en comparación con los objetivos de la actividad	Impacto significativo. No requiere medidas correctivas o protectoras intensivas	Requiere restauración correctiva o protectora. Necesario tiempo de recuperación	El impacto supera el umbral aceptable. No hay recuperación, solo compensación

Cuadro 8. Matriz de impactos y factores ambientales de la peletización

		PELETIZADO											
		Manejo en el campo		Recolección y transporte de residuos			Preprocesamiento en planta		Limpieza de impurezas			Uso del recurso	
Entorno	Factores	Rastrillado	Avance del remolque	Transporte a planta	Recolección de residuos	Secado natural	Triturador de residuos	Tamizado tromel	Recuperación de impurezas	Recuperación de astillas	Producción de pellets	Transporte a caldera	Combustión
ATMOSFERA	Cal. acústica	Bajo	Bajo	Moderado	Bajo		Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado	
	Cal. físico-química	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado		Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Grave
SUELO	Prop. físicas	Moderado	Moderado	Moderado	Bajo							Moderado	
	Prop. químicas								Moderado				
AGUA	Superficial								Moderado	Moderado			Moderado
	Subterránea								Moderado	Moderado			
MEDIO BIÓTICO	Vegetación								Bajo	Bajo			
	Fauna	Bajo	Bajo	Bajo								Bajo	
MEDIO PERCEPTUAL	Impacto visual				Bajo								
	Elem. singulares												
MEDIO SOCIOECONÓMICO	Economía								Moderado	Moderado	Positivo	Positivo	
	Salud y bienestar			Bajo					Moderado	Moderado		Moderado	Positivo

Positivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Bajo	2	2	2	3	0	1	1	2	2	1	1	1	0
Moderado	2	2	3	1	0	1	1	6	5	1	4	1	1
Grave	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Crítico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

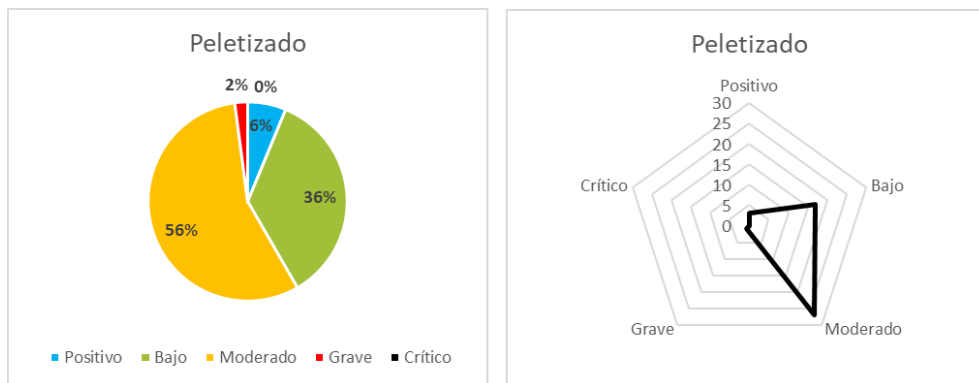


Figura 3. Gráficas de los impactos producidos por la práctica de peletizado

Vertido en vertedero

Esta práctica se aplica principalmente a los residuos de cebolla, que son difíciles de aprovechar en otros procesos. Aunque bien gestionado no representa un riesgo ambiental grave, a largo plazo genera impactos negativos en el suelo y el agua debido a la posible filtración de lixiviados contaminantes. Además, el vertido en vertederos contribuye al desperdicio de recursos, lo que se traduce en un impacto económico negativo. En términos de sostenibilidad, el impacto es moderadamente negativo, ya que no contribuye a una gestión eficiente de los residuos.

Al igual que en el resto de prácticas evaluadas, se adjunta el cuadro resumen (cuadro 9), la matriz de impactos por factores (Cuadro 10) y las gráficas resultantes (Figura 4).

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Cuadro 9. Resumen de impactos del vertido en vertedero

Positivo	Bajo	Moderado	Grave	Crítico
Total: 0	Total: 5	Total: 13	Total: 0	Total: 0
Impacto positivo	Impacto irrelevante en comparación con los objetivos de la actividad	Impacto significativo. No requiere medidas correctivas o protectoras intensivas	Requiere restauración correctiva o protectora. Necesario tiempo de recuperación	El impacto supera el umbral aceptable. No hay recuperación, solo compensación

Cuadro 10. Matriz de impactos y factores ambientales del vertido en vertedero

Entorno	Factor	Vertido en vertedero		
		Transporte a planta	Recolección de residuos	Vertido en vertedero
ATMOSFERA	Cal. acústica	Moderado	Bajo	
	Cal. físico-química	Moderado	Moderado	Moderado
SUELO	Prop. físicas	Moderado	Moderado	Moderado
	Prop. químicas			Moderado
AGUA	Superficial			Moderado
	Subterránea			Moderado
MEDIO BIÓTICO	Vegetación	Bajo		
	Fauna	Bajo		
MEDIO PERCEPTUAL	Impacto visual		Bajo	Moderado
	Elem. singulares			
MEDIO SOCIOECONÓMICO	Economía			Moderado
	Salud y bienestar	Bajo		Moderado
		0	0	0
		3	2	0
		3	2	8
		0	0	0
		0	0	0

Positivo
Bajo
Moderado
Grave
Crítico

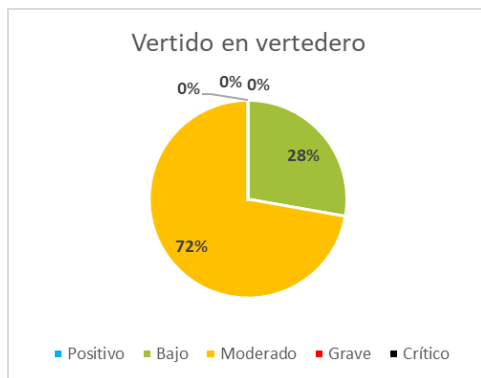


Figura 4. Gráficas de los impactos producidos por la práctica de vertido en vertedero

5. EL ANÁLISIS CICLO DE VIDA EN PHENOLEXA

Introducción a la metodología según los estándares UNE-EN ISO 14040 y 14044

El Análisis de Ciclo de Vida (de aquí en adelante, ACV) es un proceso iterativo que comprende cuatro etapas (Figura 5) y se utiliza para analizar los posibles impactos ambientales asociados a un producto, proceso o servicio con una perspectiva de ciclo de vida. Esta metodología está estandarizada según normas ISO (ISO 14040 & ISO 14044). Las cuatro etapas de la metodología son: (1) definición de objetivos y alcance, (2) análisis de inventario, (3) evaluación de impacto y (4) interpretación de resultados.

Definiendo objetivo y alcance

Desarrollar un **objetivo** de investigación claro que defina el propósito del análisis es la primera decisión a tomar al iniciar cualquier estudio de ACV. Según la norma ISO 14044, al definir el objetivo se deben declarar de manera inequívoca los siguientes elementos: la aplicación prevista del estudio, las razones para llevarlo a cabo, la audiencia prevista, es decir, a quién se pretende comunicar los resultados del estudio, y si los resultados están destinados a ser utilizados en afirmaciones comparativas que se pretenden divulgar al público.

La definición del **alcance** implica la declaración de los productos/servicios que se van a analizar. Una vez determinado el objetivo, el alcance de un ACV debe tener en cuenta y describir claramente los siguientes elementos: el sistema a estudiar; la función del sistema o de los sistemas en el caso de estudios comparativos; la unidad funcional (UF); los límites del sistema, la metodología de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) y los tipos de impacto; y las suposiciones realizadas.

Construyendo el inventario de ciclo de vida

La fase de inventario de datos de ciclo de vida (ICV) consiste en la recopilación y cuantificación detallada de todos los flujos de entrada y salida asociados a un sistema productivo a lo largo de su ciclo de vida. Estos flujos incluyen materiales, energía, emisiones, residuos y transporte, entre otros. El objetivo de esta fase es crear una base de datos sólida que refleje el uso de recursos y los impactos ambientales del producto o servicio en cada etapa de su vida útil, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

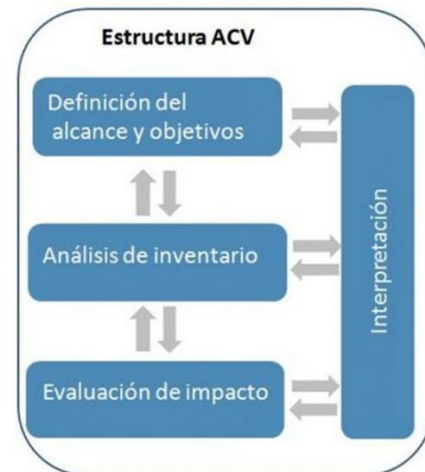


Figura 5. Esquema de un ACV según ISO 14.040

CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Evaluando el impacto ambiental de ciclo de vida

Esta fase comprende el proceso en el que se interpretan y clasifican los datos obtenidos en la fase de inventario para determinar los efectos potenciales sobre el medio ambiente. En esta etapa, los flujos de entrada y salida, como el consumo de recursos o las emisiones, se traducen en categorías de impacto ambiental, tales como cambio climático, agotamiento de recursos, acidificación, eutrofización o toxicidad. El objetivo es cuantificar cómo las actividades relacionadas con el ciclo de vida de un producto o servicio contribuyen a estos impactos, facilitando una comprensión más clara de sus consecuencias ambientales.

Interpretando resultados

La etapa final de una evaluación ambiental con la metodología de ACV es la interpretación, en la que se analizan los resultados obtenidos en las fases anteriores (inventario y evaluación de impacto) para extraer conclusiones y hacer recomendaciones. En esta fase, se evalúa la calidad y la relevancia de los datos, se identifican las limitaciones del estudio, y se verifica si los resultados son coherentes con los objetivos definidos al inicio. El propósito es proporcionar una visión clara que permita a los responsables de la toma de decisiones comprender los impactos ambientales del producto o servicio y sugerir mejoras o acciones correctivas para reducir esos impactos.

ACV *ex-ante*: un enfoque particular en el proyecto PHENOLEXA

Para facilitar la transición hacia una bioeconomía más sostenible, es fundamental desarrollar nuevas tecnologías y productos. Además, es crucial asegurarse, en las primeras etapas de desarrollo, de que estas tecnologías y productos emergentes realmente contribuyen a reducir los impactos ambientales al compararlos con el estado actual de la técnica. Esto garantizará que la inversión y la implementación de estas tecnologías se orienten hacia la consecución de una economía medioambientalmente más sostenible.

La metodología ACV *ex-ante* se enfoca en los desafíos específicos que presenta la evaluación ambiental de tecnologías emergentes en evolución, abarcando desde su escala de laboratorio hasta la comercial (Cucurachi et al, 2022). Por lo tanto, se consideró la opción más apropiada para dibujar el perfil ambiental de uno de los procesos desarrollados en el marco del proyecto PHENOLEXA: la extracción de compuestos bioactivos polifenólicos a partir de residuos de piel de cebolla roja utilizando un disolvente NADES.

La aplicación de esta metodología en el proyecto comenzó con la definición del objetivo y el alcance, lo que permitió delimitar los límites del estudio y seleccionar la unidad funcional correspondiente. Se utilizaron datos de inventario obtenidos a partir de experiencias de laboratorio en el marco del desarrollo del proyecto, así como de literatura y bases de datos, para cuantificar los indicadores de impacto ambiental elegidos, generando así los resultados del estudio. Estos resultados ambientales del ACV *ex-ante* permitieron consecuentemente calcular los impactos ambientales del proceso de biorrefinería desarrollado, señalando los puntos críticos que generaban los mayores impactos para proponer mejoras a futuro.

Dibujando el perfil ambiental. El proceso de extracción en la biorrefinería PHENOLEXA

Definiendo el objetivo (responde a por qué y para qué se realiza el ACV)

El **objetivo** del Análisis de Ciclo de Vida realizado en el proyecto PHENOLEXA ha sido dibujar el perfil ambiental del proceso de biorrefinería en cascada desarrollado en el proyecto, para extraer compuestos bioactivos polifenólicos partiendo de residuos de piel de cebolla roja y utilizando NADES como disolvente. Al evaluar el desempeño ambiental del proceso a escala de laboratorio, utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida atribucional, se han podido identificar puntos críticos en todas las etapas del proceso, lo que ha proporcionado orientaciones de mejora ambiental para desarrollos futuros.

Definiendo el alcance (responde a qué se va a analizar y cómo)

El **alcance** de este ACV ha incluido:

- **Sistema producto.** Tecnología de base para un proceso de biorrefinería en cascada que permite la extracción de compuestos polifenólicos a partir de residuos de piel de cebolla roja, utilizando un disolvente NADES (CC:GL).
- **Función del sistema.** Extraer polifenoles a partir de residuos de pieles de cebolla roja.
- **Unidad Funcional (UF).** 1 gramo de polifenoles extraídos, medidos como equivalentes de ácido gálico (mg GAE) tal como se obtienen del proceso de extracción.
- **Límites del sistema.** Se adoptó una perspectiva "**de la cuna a la puerta de la biorrefinería**" abarcando todos los procesos unitarios de la biorrefinería PHENOLEXA, desde el suministro de los residuos agrícolas hasta la producción de los compuestos polifenólicos. En particular, el análisis se centró en el proceso en cascada descrito a continuación:
 - ϕ Transporte de residuos de cáscaras de cebolla roja hasta la biorrefinería → preparación de los residuos para la extracción → preparación del disolvente NADES (CC:GL) → pretratamiento por ultrasonidos → extracción sólido-líquido con NADES → separación de la biomasa residual del extracto → encapsulación → cápsulas de extracto NADES enriquecido con polifenoles ϕ
- **Límites geográficos y temporales.** El proceso se llevó a cabo en España durante el año 2023.
- **Limitaciones.** El análisis ambiental excluyó los componentes de infraestructura relacionados con la fabricación de equipos a escala de laboratorio, tanto para la extracción de polifenoles como para su caracterización.
- **Metodología de evaluación.** Se empleó la metodología CML-IA baseline V3.09 / EU25 para la evaluación de impactos.
- **Requerimientos de los datos.** Se utilizaron datos primarios proporcionados por los socios tecnológicos del proyecto para modelar el sistema producto. Los datos secundarios se obtuvieron de la base de datos Ecoinvent en su versión 3, adaptando los procesos relevantes a las condiciones específicas de España.

Construyendo el inventario de ciclo de vida (ICV)

La recopilación de datos se realizó mediante plantillas de Excel diseñadas y distribuidas entre los diferentes socios, siguiendo un enfoque de reporte continuo para asegurar la máxima calidad de los mismos. Dado que gran parte de la información provenía de experimentos a escala de laboratorio, se manejó con cautela y se recurrió a estimaciones parciales en algunos casos. El inventario del ciclo de vida incluyó operaciones y procesos de extracción específicos a nivel de laboratorio, y el consumo eléctrico de esos equipos se determinó registrando su tiempo de funcionamiento junto con su potencia nominal. El mix eléctrico utilizado, para la evaluación de estos impactos de consumo eléctrico, se calculó considerando los datos de generación promedio de electricidad y de importación/exportación de España en 2022 (Agencia Internacional de Energía, 2024), adaptando los procesos de la base de datos Ecoinvent para modelarlos.

Los datos del inventario de ciclo de vida realizado en el proyecto son confidenciales y solo están disponibles para los socios del proyecto.

El Cuadro 11 detalla cuáles fueron los parámetros de partida para la recopilación de datos y el Cuadro 12 presenta, mediante una descripción únicamente textual, el tipo de datos que fue necesario cuantificar en cada etapa para su posterior modelado ambiental.

Cuadro 11. Parámetros de partida considerados para la etapa de ICV

Parámetros de partida	
Sistema analizado	Biorrefinería en España
Tipo de residuo	Pieles de cebolla roja
Disponibilidad de residuo en España en 2023	85.000 t/año
Contenido en agua del residuo	18.4 %
Cantidad de residuo seco	15.640 t/año
Polifenoles totales en residuo	64.3 mg GAE / gramo de residuo seco
Residuo seco necesario para la obtención de 1 gramo de polifenoles	15.6 gramos

Cuadro 12. Descripción sintética del tipo de datos recopilados para la etapa de ICV

Etapa de ciclo de vida	¿En qué consistió?	¿Qué se modeló ambientalmente?
Transporte de residuos hasta la biorrefinería	Con base en el trabajo prospectivo desarrollado en el proyecto, se fijó en 330 km el radio máximo para la entrega de residuos de piel de cebolla en España, desde las instalaciones de procesamiento donde se generan dichos residuos.	Cantidad transportada por kilómetros recorridos.
Preparación de los residuos	Acondicionamiento del residuo con un molino para trocearlo, con el objetivo de aumentar la superficie de contacto, mejorar la penetración del disolvente y homogeneizar el material.	Consumo eléctrico del molino para trocear el residuo

Cuadro 12. Descripción sintética del tipo de datos recopilados para la etapa de ICV

Etapa de ciclo de vida	¿En qué consistió?	¿Qué se modeló ambientalmente?
Preparación del disolvente NADES (CC:GL)	<p>Un disolvente NADES es un tipo de disolvente eutéctico profundo, formado por la combinación de dos o más componentes naturales, normalmente sólidos a temperatura ambiente, que al mezclarse en proporciones específicas se licúan, formando un líquido.</p> <p>Se preparó mediante un método de calentamiento como sistemas de tres componentes con molaridad igual, siendo el agua el tercer componente (25%).</p>	<p>Materias primas (CC:GL): cloruro de colina, glucosa y agua.</p> <p>Consumo eléctrico para el proceso de agitación y calentamiento</p>
Pretratamiento por ultrasonidos	<p>El residuo troceado, junto al disolvente CC:GL, se sometió a un pretratamiento con ultrasonidos.</p> <p>Se añadió ácido tricloroacético para mantener la estabilidad de las antocianinas presentes en las pieles de cebolla roja.</p>	<p>Cantidad de ácido tricloroacético y consumo eléctrico del equipo de ultrasonidos</p>
Extracción sólido-líquido con NADES	<p>La mezcla proveniente del pretratamiento con ultrasonidos se agitó a temperatura ambiente con un agitador magnético para dar lugar a la extracción.</p>	<p>Electricidad para la agitación</p>
Separación de la biomasa residual del extracto	<p>Al finalizar la extracción, la mezcla se centrifugó para separar la biomasa residual de partida (pieles de cebolla roja) del disolvente NADES enriquecido ya con los polifenoles extraídos</p>	<p>Electricidad para el centrifugado</p>
Encapsulación	<p>Con el fin de proteger los ingredientes activos polifenólicos, se desarrolló un proceso de encapsulación utilizando un polímero biodegradable.</p>	<p>Adición de disolución de alginato al 1% y disolución de CaCl₂ al 1%.</p> <p>Electricidad para la agitación.</p>

Evaluando el impacto de ciclo de vida (EICV)

Los impactos ambientales, asociados a los datos de entrada del inventario, se obtuvieron de la base de datos Ecoinvent, versión 3, y se modelaron utilizando el software SimaPro® v9.5 (Pré-Consultants). La evaluación de impacto del ciclo de vida se realizó a nivel de caracterización mediante la metodología CML-IA (Centrum voor Milieukunde Leiden) a nivel de punto medio, la cual abarca 11 categorías de impacto: agotamiento abiótico, agotamiento abiótico de combustibles fósiles, cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad acuática en agua dulce, ecotoxicidad acuática marina, ecotoxicidad terrestre, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización.

La selección de estas categorías de impacto permitió obtener una visión integral de los efectos ambientales asociados a la biorrefinería PHENOLEXA que utiliza pieles de cebolla roja como materia prima y NADES como disolvente para la extracción de polifenoles.

Interpretación. Resultados

A continuación, se presentan, en el Cuadro 13, los resultados de la evaluación ambiental de la biorrefinería PHENOLEXA que utiliza NADES como disolvente para la extracción de polifenoles de las pieles de cebolla roja. Esta evaluación se basó en una perspectiva de “*cuna a puerta de la biorrefinería*” y se ha expresado en términos de unidad funcional (1 gramo de polifenoles extraídos), considerando España como ubicación geográfica.

Cuadro 13. Perfil ambiental, por gramo de polifenoles extraídos, de la biorrefinería PHENOLEXA

Categoría de impacto ambiental	Unidad	Impacto
Agotamiento abiótico	kg Sb eq/FU	3.07E-05
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ/FU	7.51E+01
Cambio climático	kg CO ₂ eq/FU	4.88E+00
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq/FU	5.22E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq/FU	2.99E+00
Ecotoxicidad acuática en agua dulce	kg 1,4-DB eq/FU	2.17E+00
Ecotoxicidad acuática marina	kg 1,4-DB eq/FU	3.86E+03
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq/FU	2.31E-02
Oxidación fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq/FU	9.51E-04
Acidificación	kg SO ₂ eq/FU	1.92E-02
Eutrofización	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq/FU	5.27E-03

Tras evaluar el rendimiento ambiental global de la biorrefinería PHENOLEXA, se analizaron las contribuciones individuales de cada etapa del proceso para cada impacto ambiental evaluado, es decir, desde el transporte de los residuos agrícolas hasta el proceso de extracción teniendo lugar en la biorrefinería. Este análisis permitió dibujar el perfil ambiental del proceso por etapas, tal y como se muestra en la Figura 6, e identificar consecuentemente sus puntos críticos en términos de sostenibilidad ambiental.

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

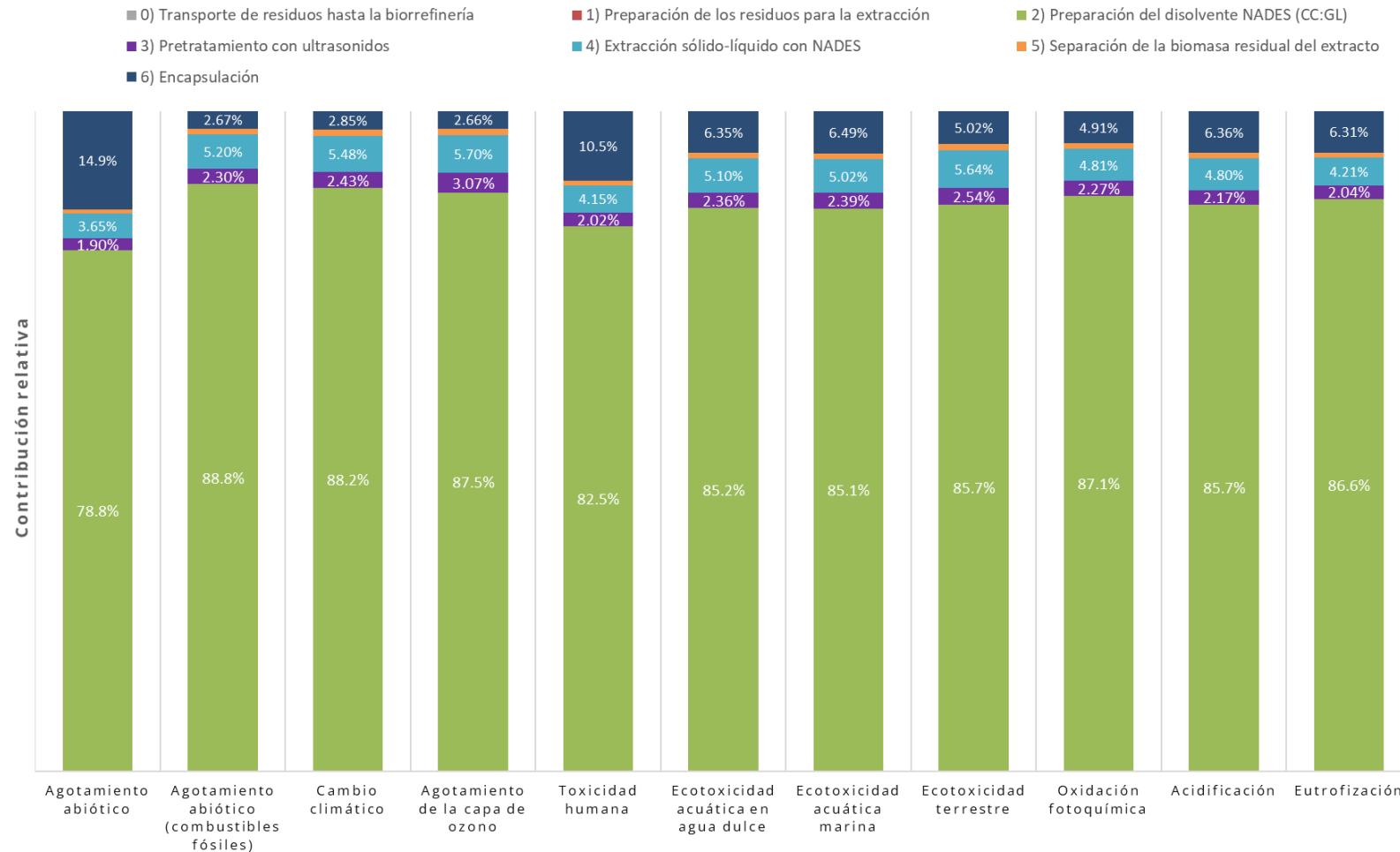


Figura 6. Perfil ambiental, por gramo de polifenoles extraídos, de cada etapa involucrada en el proceso de biorrefinería en cascada PHENOLEXA

CONAMA 2024

PERFIL AMBIENTAL DE LA BIORREFINERÍA PHENOLEXA

Se observa cómo la etapa de preparación del disolvente NADES es el principal punto crítico ambiental de la biorrefinería PHENOLEXA, con una contribución significativa que varía entre el 79% y el 87%, dependiendo de la categoría de impacto analizada. Esta etapa afecta considerablemente a las categorías de agotamiento abiótico (combustibles fósiles) y potencial de calentamiento global, debido principalmente al elevado consumo de electricidad que es necesario para la agitación y el calentamiento del disolvente, con toda la energía proveniente del mix eléctrico español. Una de las características distintivas de los disolventes NADES es su alta viscosidad en comparación con otros disolventes, lo que incrementa significativamente el consumo energético durante los procesos de agitación y calentamiento necesarios para su preparación, de ahí su contribución al impacto ambiental.

La etapa de encapsulación es la segunda que más contribuye en impacto ambiental, especialmente en las categorías de agotamiento abiótico y toxicidad humana.

El pretratamiento por ultrasonido también genera impactos ambientales superiores al 1%, con contribuciones que oscilan entre el 1.9% y el 3%, como se muestra en la Figura 6. Estos impactos vuelven a estar principalmente relacionado con el consumo eléctrico de la unidad de ultrasonido, siendo el impacto del ácido tricloroacético añadido en la extracción de cáscaras de cebolla roja poco significativo.

Por último, tres etapas de las siete etapas del proceso presentan contribuciones no significativas (por debajo del 1%): la etapa de transporte, desde la recolección de los residuos en las instalaciones de procesamiento hasta la biorrefinería, la preparación de los residuos para la extracción, antes del pretratamiento, y la etapa de separación de biomasa del disolvente, una vez realizada la extracción. Estas etapas solo se consume electricidad, de forma no intensiva, y no se emplean productos químicos o compuestos adicionales, a diferencia de otras fases del proceso.

6. CONCLUSIONES

Impacto Ambiental de las prácticas de gestión de residuos

A continuación, se muestran las principales conclusiones obtenidas tras el EsIA de las prácticas de gestión de residuos agrícolas evaluadas en el marco del proyecto PHENOLEXA. Se analizan tanto los beneficios ambientales como económicos de cada técnica, así como los desafíos y consideraciones asociadas a su implementación. Además, se proponen soluciones alternativas para maximizar la eficiencia en la revalorización de los residuos, con un enfoque en la reducción de los impactos ambientales y la mejora de la sostenibilidad. Cada práctica es evaluada en términos de su viabilidad en el contexto de una bioeconomía circular.

Cobertura Vegetal: Entre las prácticas analizadas, el mulching se destaca por sus impactos positivos tanto ambientales como económicos. Esta técnica mejora la estructura del suelo y sus propiedades físico-químicas, y reduce el uso de insumos agrícolas. Sin embargo, es esencial monitorear la cantidad de materia orgánica incorporada y su tiempo de descomposición. Para los residuos que no puedan ser manejados mediante esta técnica, la biorrefinería PHENOLEXA ofrece una alternativa eficiente, debiendo la recolección realizarse tras la poda (olivos, viñas) o cosecha (achicoria), antes de la astillado, con el fin de facilitar el manejo y minimizar los costos e impactos del transporte. Se recomienda centralizar el proceso en áreas con grandes explotaciones o pequeñas fincas concentradas.

Peletizado: Esta práctica ofrece una solución económica y ecológica al aprovechar los residuos como fuente de energía. Sin embargo, debe considerarse el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero durante la combustión. Se recomienda la recolección óptima de los residuos en el campo después de su apilado, y para fincas pequeñas, sería ideal establecer un punto de recogida cercano a la planta de peletización para reducir los costos económicos y ambientales del transporte. Cabe destacar que la biorrefinería PHENOLEXA podría competir con esta actividad económica, lo que podría aumentar los costos de adquisición de materia prima.

Quema en campo: Aunque es una alternativa económica, la quema en campo tiene altos costos ambientales debido a la emisión de gases de efecto invernadero y los riesgos de incendios accidentales. La biorrefinería PHENOLEXA puede intervenir recolectando los residuos apilados antes de ser quemados, siguiendo las mismas recomendaciones de recolección en áreas concentradas para minimizar el impacto del transporte.

Vertido en vertedero: Aunque el vertido es una opción común para residuos de cebolla, su impacto ambiental puede ser significativo si no se minimiza la cantidad de residuos que se gestionan de esta manera. La biorrefinería PHENOLEXA puede ofrecer una alternativa viable y de alto valor para el uso de estos residuos. El lugar óptimo para la recolección de la materia prima serían las plantas procesadoras de cebolla, independientemente de la forma en que se utilicen.

En conclusión, la integración de la biorrefinería PHENOLEXA en la gestión de residuos agrícolas no solo reduce el impacto ambiental, sino que también ofrece soluciones económicas viables para la revalorización de residuos, contribuyendo así a un modelo de economía circular.

Biorrefinería con extracción NADES: eficiencia prometedor, huella de carbono optimizable

La evaluación ambiental del proceso de la biorrefinería PHENOLEXA que utiliza NADES como disolvente reveló la etapa de preparación del disolvente como la principal contribución a los impactos ambientales.

Para realizar una evaluación integral del rendimiento del sistema de extracción estudiado en el proyecto y cuantificar los posibles beneficios ambientales del uso de residuos agrícolas, se analizaron conjuntamente la eficiencia de la extracción, en rendimiento de obtención de polifenoles, y la huella de carbono del proceso de la biorrefinería PHENOLEXA en comparación con un método de extracción sólido-líquido convencional, que emplea una disolución de etanol al 60%, y aplicando las mismas condiciones de pretratamiento y extracción que las utilizadas con el disolvente NADES. Los resultados se muestran en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Tendencia en la extracción de polifenoles según disolvente: rendimiento e impacto ambiental medido en huella de carbono

Residuo / disolvente	Polifenoles obtenidos por gramo de materia prima (mg GAE/ gramo residuo seco)	Huella de carbono ¹ del proceso (kgCO ₂ eq / gramo polifenol obtenido)
Pieles de cebolla roja / NADES	64.3	4.88
Pieles de cebolla roja / etanol	57.5 ²	1.04 ²

Según los resultados anteriores, el proceso de biorrefinería que utiliza NADES como disolvente para la extracción sólido-líquido de polifenoles, a partir de residuos de pieles de cebolla roja, presenta una mayor eficacia en la obtención en comparación con el mismo proceso que emplea un disolvente orgánico, el etanol. Sin embargo, cuando se compara la huella de carbono de ambos procesos, el proceso de extracción utilizando NADES no presenta una huella de carbono significativamente menor en comparación con el que utiliza etanol. De hecho, la huella de carbono del proceso que utiliza NADES es mayor.

Los resultados del perfil ambiental obtenido muestran que, aunque el uso de disolventes NADES para la extracción de polifenoles es prometedor, todavía existen oportunidades para reducir su huella de carbono. Con más investigación y el desarrollo de técnicas más sostenibles, esta tecnología podría convertirse en una alternativa favorable para la extracción de polifenoles de residuos agrícolas. La evaluación ambiental realizada ha destacado la necesidad de implementar métodos de agitación energéticamente eficientes en la etapa de preparación del disolvente, integrando, por ejemplo, fuentes de energía renovables.

¹ Indicador ambiental "Cambio Climático" en la metodología ambiental utilizada.

² Resultados propios del proyecto, para una extracción sólido-líquido convencional utilizando una disolución de etanol al 60%.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Internacional de Energía, 2024: <https://www.iea.org/countries>
- [2] Conesa Fernández-Vítora, V., Conesa Ripoll, V., Conesa Ripoll, L. A., Ros Garro, V., & Esteban Bolea, M. T. (1997). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (3rd Edition). Mundi-Prensa.
- [3] Cucurachi, S., Steubing, B., Siebler, F., Navarre, N., Caldeira, C., & Sala, S. (2022). *Prospective LCA methodology for novel and emerging technologies for bio-based products*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [4] EUROSTAT 2022: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- [5] Fernández, O. (2020). Promoviendo el aprovechamiento de la poda de viñedo.
- [6] ISO 14040. *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. 2006
- [7] ISO 14044. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. Geneva : International Standard Organisation, 2006
- [8] Sharma, K., Mahato, N., Nile, S. H., Lee, E. T., & Lee, Y. R. (2016). Economical and environmentally-friendly approaches for usage of onion (*Allium cepa* L.) waste. *Food & Function*, 7(8), 3354–3369.
- [9] Oldershaw, M. R. (2021, April 18). Improved composting of onion waste, and its use to control *Allium* white rot. http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=HL0140LFV_1398_EXE.pdf
- [10] Zabaniotou, A., Rovas, D., Libutti, A., & Monteleone, M. (2015). Boosting circular economy and closing the loop in agriculture: Case study of a small-scale pyrolysis-biochar based system integrated in an olive farm in symbiosis with an olive mill. *Environmental Development*, 14, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.12.002>