

Innovación en la gestión de residuos de café y de poda

Extracción de compuestos de valor añadido



CONAMA 2024

INNOVACIÓN EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE CAFÉ Y DE PODA. EXTRACCIÓN DE
COMPUESTOS DE VALOR AÑADIDO

Autor Principal: Carla Bartolomé (ITENE)

Otros autores: Annabel Serpico (ITENE) Cristina González (ITENE), Mar Tronch (ITENE), Miriam Lorenzo (ITENE), Sergio Clemente (ITENE), Antonio Dobón (ITENE), Rosa Doménech (ITENE)

ÍNDICE

1. Introducción
2. Extracción de compuestos de valor añadido a partir de residuos de café mediante CO₂ supercrítico
 - 2.1 Caracterización y optimización de la extracción de aceites con CO₂ supercrítico
 - 2.2 Comparación de resultados mediante el empleo de cosolventes verdes
 - 2.3 Caracterización de los compuestos de valor añadido obtenidos mediante CO₂ supercrítico
 - 2.4 Conclusiones
3. Extracción de compuestos de valor añadido a partir de residuos de poda mediante hidrólisis enzimática
 - 3.1 Caracterización y optimización de la hidrólisis de residuos de poda
 - 3.2 Comparación de la producción neta de biogás
 - 3.3 Producción de bioestimulantes a partir del hidrolizado de residuos de poda
 - 3.4 Conclusiones
4. Bibliografía

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos urbanos es una consecuencia inevitable de la actividad humana, siendo la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) el mayor componente del residuo municipal, representando un 42% (1). En este sentido, la gestión de los residuos orgánicos (FORSU y lodos de depuradora) se está convirtiendo en una preocupación de gran relevancia y, simultáneamente, en una oportunidad para Europa. Por una parte, el desarrollo de nuevas tecnologías para la recuperación de materiales y energía, junto con la evolución de la legislación, posibilitan la creación de valor económico a partir de los residuos orgánicos. Por otra parte, la disposición de estos residuos representa una preocupación significativa que busca soluciones para mitigar su impacto ambiental, haciendo de los residuos orgánicos y los lodos de depuradora candidatos ideales para la implementación de modelos de bioeconomía en ciudades y regiones.

Por ello, el proyecto HOOP busca prestar asistencia a ocho ciudades y regiones faro con el fin de desarrollar iniciativas de bioeconomía circular urbana a gran escala que generen productos a partir de biorresiduos urbanos y aguas residuales. La bioeconomía circular urbana (UCBE) proporciona tecnologías que tratan los residuos como materia prima para la producción de bioproductos con mayor valor añadido que los existentes. Desde ITENE se ha trabajado en incrementar la circularidad de dos tipos de residuos para 2 regiones: posos de café (Macedonia Occidental) y residuo de poda (Münster). Para la valorización de estos residuos se han empleado dos tecnologías que permiten obtener diferentes bioproductos: la tecnología de CO₂ supercrítico y la hidrólisis enzimática.

2. EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR AÑADIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ MEDIANTE CO₂ SUPERCRÍTICO

En la región de Macedonia Occidental, uno de los proyectos de asistencia prestada a esta ciudad faro está centrado la búsqueda de métodos de valorización para los residuos de posos de café provenientes del canal HoReCa (Hoteles, Restaurantes y Cafeterías). A pesar de que estos residuos presentan un alto contenido en carbohidratos, ácidos grasos y polifenoles, suelen valorizarse energéticamente o desecharse, perdiendo todos estos compuestos de interés.

Una opción que está ganando adeptos consiste en **extraer los aceites de café que contienen estos residuos con CO₂ supercrítico (scCO₂), ya que es un método más sostenible y no destruye los compuestos de mayor valía**. Por ello, en el marco del proyecto HOOP, ITENE se ha centrado la optimización de la extracción de compuestos de valor añadido (fracción lipídica y otro tipo de compuestos como antioxidantes) mediante esta tecnología, considerada como un disolvente verde alternativo. El scCO₂, debido a su viscosidad y difusividad similares a las de un gas, y a su densidad y poder disolvente similares a los de un líquido, está actualmente avalado y comúnmente aceptado como disolvente industrial, especialmente cuando se trata de productos termolábiles de alto valor añadido.

En HOOP se ha buscado optimizar la conversión de estos residuos de posos de café en aceites y, por ende, la producción de ácidos grasos mediante la extracción con scCO_2 . Por otro lado, también se ha evaluado la extracción con cosolventes verdes para optimizar las condiciones de reacción.

En el presente documento se incluyen los resultados obtenidos en la caracterización y la optimización con scCO_2 , así como una comparativa de resultados con el empleo de cosolventes verdes y caracterización de los compuestos de valor añadido obtenidos.

2.1 Caracterización y optimización de la extracción de aceites con CO_2 supercrítico

La extracción de compuestos de alto valor añadido mediante la tecnología del CO_2 supercrítico a partir de los posos de café gastados, es una vía de extracción más sostenible que genera productos para su aplicación en industrias como la cosmética, la farmacia y la química fina, en sustitución del uso de otros solventes convencionales como el hexano. La homogeneización de los residuos de posos de café recibidos de Grecia en ITENE y su secado permitió caracterizar en las mejores condiciones este material lignocelulósico para poder explorar las mejores formas de valorización y optimización de estas tecnologías. Estos procesos son importantes debido a que el residuo de café tiene una cantidad de humedad muy elevada en los puntos de recogida, así como una tendencia al apelmazamiento y a la producción de microorganismos debido a que es el medio de cultivo idóneo para su proliferación, lo que puede llevar a la destrucción de compuestos de interés.



Figura 1. Proceso seguido en ITENE para la extracción de aceites a partir de residuos de posos de café (ITENE)

En primer lugar, el material se secó durante tres días a $105\text{ }^\circ\text{C}$ para eliminar la máxima cantidad de agua posible del material sin destruir los compuestos termolábiles que pudiera contener el residuo y que tendrán un gran potencial en industrias de química fina. Con el secado y almacenado en bolsas herméticas se reduce, no solo la humedad, sino el crecimiento de microorganismos y hongos en el residuo de café. Además, el residuo se desapelmaza para mejorar la extracción de aceites en el proceso de extracción con CO_2 supercrítico.

Con el residuo pretratado se procede a caracterizar el material para conocer el contenido en los distintos compuestos volátiles de la lignocelulosa y el contenido en grasas monoinsaturadas, poliinsaturadas y saturadas, que se extraerán en el proceso. Con un análisis termogravimétrico

se puede obtener los valores de humedad, materia volátil (holocelulosa y lignina) y cenizas, y con una extracción de ácidos grasos convencional con hexano se dilucida el contenido en ácidos grasos. La humedad se determina para comprobar que no es un parámetro elevado y crítico en la extracción, los compuestos de lignocelulosa y cenizas se evalúan como una medida interesante para otros procesos de valorización como la hidrólisis, la pirólisis y la gasificación, y los ácidos grasos serán la referencia para evaluar la eficiencia de conversión a aceites en el proceso de extracción con CO₂ supercrítico. Estos últimos suelen estar distribuidos entre ácidos grasos saturados, principalmente palmítico y esteárico, y poliinsaturados, entre los que destaca el ácido linoleico (2).

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica inicial de los residuos de posos de café

Compuesto	%
Humedad	5,09
Holocelulosa	50,21
Lignina	36,44
Ceniza	2,04
Contenido en grasas	9,34

Fuente: ITENE

Mediante la tecnología de CO₂ supercrítico se obtuvo un rendimiento de conversión de aceite extraído de aproximadamente 6,5 %a partir de posos de café. Para ello se combinaron diferentes condiciones de pretratamientos térmicos y físicos (tamaño de partícula <1 mm, 105 °C, 3 días) y del equipo de extracción con CO₂ supercrítico. Mientras que la influencia de la temperatura fue apenas perceptible, la presión es un parámetro decisivo en el proceso, ya que aumenta considerablemente la conversión a aceites cuando se incrementa la presión, así como el tiempo de extracción.

Como conclusión de los ensayos, es preferible trabajar a temperaturas superiores a 40 °C para evitar problemas técnicos relacionados con la proximidad a la fase no supercrítica. Además, combinar tiempos de extracción entre 2 y 3 horas con altas presiones resulta ser la estrategia preferida para maximizar la conversión a aceites extraídos con CO₂ supercrítico.

2.2 Comparación de resultados mediante el empleo de cosolventes verdes

Además de la extracción con CO₂ supercrítico, también se ha evaluado el uso de un cosolvente junto con esta tecnología para medir el rendimiento (masa total de aceite recuperado) y determinar la existencia de mejoras en el proceso, tal y como viene indicado en otros estudios donde se indica que se incrementa la extracción entre un 1 y 2% utilizando diferentes cosolventes junto con el CO₂ supercrítico (3).

En este sentido, el resultado fue la obtención de una mayor producción neta de aceite (porcentaje en masa) con la utilización de cosolvente. El valor resultante fue un 1% mayor en comparación con la producción de aceite obtenida únicamente utilizando CO₂ supercrítico (Cuadro 2). Este resultado también se comparó con la producción de aceite a partir de hexano,

el cual es un disolvente altamente empleado en la industria y poco sostenible (4). Aunque se incrementa la producción de aceite mediante extracción, aún hay que realizar estudios técnicos para determinar si es realmente útil incrementar la complejidad del proceso añadiendo un co-solvente para obtener una mejora tan leve en la conversión a aceite.

Cuadro 2. Comparativa de la Producción neta de aceite a partir de diferentes métodos de extracción

Compuesto	%
Hexano	9,3
Sc CO ₂ + Cosolvente	7,4
Sc CO ₂	6,5

Fuente: ITENE

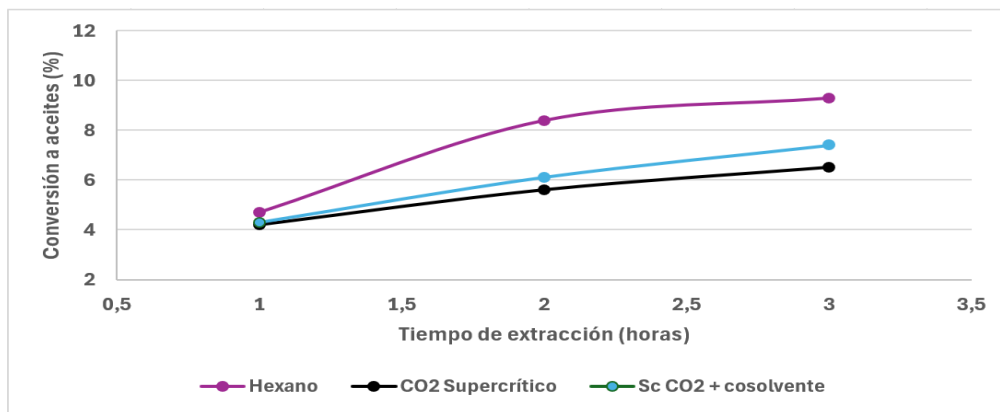


Figura 2. Resultados obtenidos de conversión a aceites en función del tiempo y diferentes métodos de extracción (ITENE)

2.3 Caracterización de los compuestos de valor añadido obtenidos mediante CO2 supercrítico

La caracterización del aceite extraído mediante CO2 supercrítico se realizó en dos planos, el primero para medir la cantidad de ácidos grasos y el perfil de estos en el material extraído y, el segundo, para determinar las propiedades del aceite extraído en cuanto a poder antioxidante y contenido en fenoles totales.

El contenido en ácidos grasos y el perfil se realizó mediante espectrometría de gases acoplada a detector de ionización por llama (GC-FID), ya que las concentraciones de ácidos grasos son muy elevadas en las muestras extraídas. Los análisis de poder antioxidante se llevaron a cabo tanto mediante análisis de la peroxidación lipídica como mediante análisis de la capacidad antioxidante total de las muestras. Finalmente, los fenoles totales se midieron mediante el método de Folin-Ciocalteu, un método para la determinación de antioxidantes fenólicos y polifenólicos.

Los principales resultados obtenidos fueron los siguientes:

- **Los análisis de ácidos grasos** realizados a las muestras de aceite extraído con la tecnología de CO₂ supercrítico mostraron que en todos los casos las muestras poseen más del 80% de su composición en masa de ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados.
- Los principales componentes del perfil de ácidos grasos fueron los ácidos palmítico y linoleico, y no variaron significativamente con el uso de co-solvente.

Cuadro 3. Concentración de ácidos grasos mayoritarios en el aceite extraído con CO₂ supercrítico de posos de café

Compuesto	Solvente	Producción
Ácido linoleico	Sc CO ₂	35,7 % en masa
	Sc CO ₂ + cosolvente	36,9 % en masa
Ácido palmítico	Sc CO ₂	45,9 % en masa
	Sc CO ₂ + cosolvente	47,5 % en masa
Ácido oleico	Sc CO ₂	11,4 % en masa
	Sc CO ₂ + cosolvente	10,8 % en masa
Ácido esteárico	Sc CO ₂	5,4 % en masa
	Sc CO ₂ + cosolvente	4,4 % en masa

Fuente: ITENE

- **La peroxidación lipídica**, el mecanismo de oxidación mediante radicales libres más común en sistemas biológicos, se midió mediante el análisis del ácido tiobarbitúrico (TBAR) cuyos resultados se dan en mg de malondialdehído (MDA) por kg de aceite extraído. El uso de cosolvente mejora este parámetro en 6 veces con respecto a la utilización de CO₂ puro.

Cuadro 4. Peroxidación lipídica de las muestras de aceite extraído con CO₂ supercrítico de posos de café

Característica	Solvente	Producción
Oxidación lipídica	Sc CO ₂	1,48 mg/kg aceite
	Sc CO ₂ + cosolvente	0,26 mg/kg aceite

Fuente: ITENE

- **La capacidad antioxidante** es una medida de la reducción de la formación de radicales libres y la estimulación de los sistemas de defensa biológicos. La capacidad antioxidante total se determinó mediante la eliminación de radicales del extracto de aceite con el método del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (método DPPH). La capacidad de inhibición (CI50) se expresa en mg/mL. Al elevarse este valor, peor es su capacidad antioxidante porque inhibe la oxidación en menor medida.

La capacidad antioxidante mejora con la adición de cosolvente, aumentando aproximadamente 6 veces en condiciones óptimas.

Cuadro 5. Capacidad antioxidante de las muestras de aceite extraído con CO₂ supercrítico de posos de café

Característica	Solvente	Resultado
Capacidad antioxidante	Sc CO ₂	107,4 mg/mL
	Sc CO ₂ + cosolvente	16,2 mg/mL

Fuente: ITENE

- **El contenido de fenoles totales** se midió mediante el método de Folin-Ciocalteu. Este método se basa en la reacción de los fenoles con el reactivo de Folin-Ciocalteu, que contiene fosfomolibdato y fosfowolframato. Estos compuestos se oxidan y forman complejos fosfomolibdico-fosfotúngstico. La cantidad de sustancia analizada se mide por la inhibición de la oxidación del reactivo.

La concentración de fenoles se reduce en aproximadamente un 30 % cuando se añade cosolvente en el proceso junto con el CO₂ supercrítico.

Cuadro 6. Contenido total de fenoles en las muestras de aceite extraído con CO₂ supercrítico de posos de café

Propiedades medidas	Solvente	Resultado
Contenido fenólico	Sc CO ₂	43,2 mg/100 g
	Sc CO ₂ + cosolvente	30,1 mg/ 100 g

Fuente: ITENE

En vista de los resultados obtenidos en la caracterización de los compuestos de valor añadido, y de la comparativa entre emplear únicamente CO₂ supercrítico o combinarlo con cosolventes, esta última opción genera un producto aceitoso con mejores propiedades antioxidantes. Si se pretende utilizar el producto sin una destilación selectiva exhaustiva de algún compuesto para fines directos sería interesante utilizar cosolvente en su extracción maximizando la capacidad antioxidante.

En cambio, si lo único que pretendemos es extraer gran cantidad de aceite y mejorar la proporción y contenido de ácidos grasos para industria cosmética o farmacéutica, el perfil y proporción de estos apenas se ve influido por el uso de cosolventes. Si se mejora la conversión total del proceso a aceites en torno a un 1% pero es necesario más investigación para ver si realmente sería una tecnología viable desde el punto de vista tecno-económico y medioambiental.

La utilización de CO₂ puro es óptimo para generar mejores rendimientos de fenoles totales y, por lo tanto, maximizaría la generación de polifenoles como los diterpenos cafestol y kahweol. Si se utiliza cosolvente la concentración de fenoles totales se reduce sensiblemente viéndose afectados por la intensificación de la extracción. El café y sus residuos son la fuente alimentaria de cafestol y kahweol, un par de furanoditerpenoides que tienen propiedades antitumorales, anticancerígenas y antiinflamatorias. Estos diterpenos actúan sobre las características del cáncer, como la resistencia a la muerte celular, la inducción de la angiogénesis y la activación de la migración y la metástasis (5).

2.4 Conclusiones

La extracción de aceites mediante CO₂ supercrítico de posos gastados de café es una tecnología viable y medioambientalmente favorable comparada con métodos convencionales de extracción. Pese a ello, mantener las condiciones supercríticas del CO₂ sigue requiriendo de investigación en la mejora de la tecnología para abaratar costes y aumentar eficiencias.

Además, se debe continuar explorando métodos de maximización de producción de polifenoles, procesos de detección complejos de terpenos y flavonoides, y su consecuente separación selectiva. Compuestos como el cafestol o el kahweol tienen un potencial elevado para industrias como la farmacia, la cosmética y la química fina en general.

También se deben explorar métodos de valorización de la fracción sólida que permanece inalterada en el proceso de extracción, como la pirólisis para producir biochar de alta calidad.

3. EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR AÑADIDO A PARTIR DE RESIDUOS PODA MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA

Este proyecto de asistencia a la ciudad de Münster (Alemania) se centra en valorizar el residuo del rebosadero de cribado procedente del compostaje de residuos de jardinería de Münster (residuo de poda). Este material presenta un alto contenido de lignina y celulosa, compuestos estructurales complejos que dan rigidez a las plantas y son resistentes a la descomposición microbiana, lo cual dificulta el proceso de compostaje. La lignina, en particular, es difícil de degradar sin la presencia de hongos especializados, lo que ralentiza el proceso de compostaje.

El objetivo es tratar este material difícil de compostar mediante procesos de hidrólisis enzimática, transformándolo en un hidrolizado rico en azúcares que pueda alimentar al digestor anaerobio con el fin tanto de aumentar la **producción de biogás** como de digestato, mejorando aún más la circularidad del proceso mediante el uso de estos hidrolizados ricos en azúcares 2G como fuente de nutrientes para cultivar **bioestimulantes microbianos**. En particular, debido a que los materiales lignocelulósicos pueden ser inaccesibles para los microorganismos hidrolíticos, los procesos de pretratamiento e hidrólisis pueden ser etapas determinantes. Por ello, se llevaron a cabo procesos de homogeneización y caracterización fisicoquímica de los residuos de poda para facilitar los posteriores pretratamientos y procesos de hidrólisis enzimática (EH). Además, se optimizaron diferentes pretratamientos y procesos de hidrólisis evaluando condiciones térmicas y químicas, así como cócteles de enzimas celulíticas para conseguir un mayor contenido en azúcares libres a diferentes escalas: desde escala de laboratorio hasta procesos de 4 L de volumen.

Estos hidrolizados enriquecidos con azúcar 2G se utilizaron, por un lado, para la producción de biogás y, por otro, para producir bioestimulantes microbianos (4 especies bacterianas diferentes). Además, se evaluaron *in vitro* sus actividades promotoras del crecimiento vegetal (PGP), como su capacidad para solubilizar fosfato, fijar nitrógeno y producir sideróforos.

3.1 Caracterización y optimización de la hidrólisis de residuos de poda

La valorización de residuos de poda a través de procesos hidrolíticos ofrece una alternativa sostenible para generar compuestos de alto valor añadido, como bioestimulantes para la industria agraria. La homogenización de estos residuos vegetales permite obtener una materia prima uniforme, adecuada para procesos bioquímicos que faciliten la liberación de compuestos fermentables. Mediante la caracterización, es posible identificar la composición química y las fracciones lignocelulósicas presentes en los residuos, lo cual es fundamental para optimizar el proceso de hidrólisis. Esta etapa de **hidrólisis es clave, ya que permite la ruptura de estructuras complejas y la liberación de azúcares simples que servirán como sustrato para la producción de biogás o el cultivo de microorganismos PGP** (Figura 3). Este enfoque no solo contribuye a la gestión sostenible de residuos, sino que también apoya el desarrollo de productos de interés industrial.

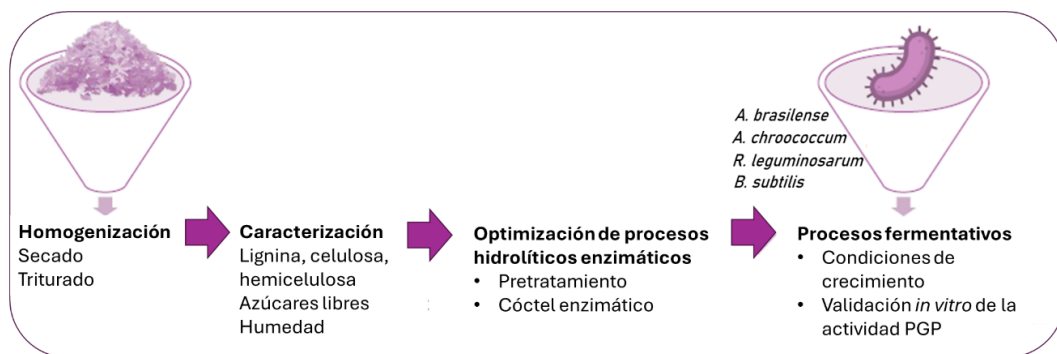


Figura 3. Proceso seguido en ITENE para la obtención de bioestimulantes (ITENE)

En primer lugar, los residuos de poda de Münster se homogenizaron y acondicionaron para facilitar su conservación, que consistió en un secado y triturado hasta obtener partículas de 2mm de tamaño. Además, se caracterizaron para determinar las propiedades fisicoquímicas que determinarían su potencial de valorización, así como distintos parámetros que definirían el diseño experimental y la optimización de los parámetros operacionales.

Para determinar la composición de estos residuos, se realizaron diferentes análisis que determinaron la humedad, el contenido de azúcares libres y diferentes biopolímeros presentes en los residuos lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Cuadro 7). Estos parámetros son cruciales para calcular el rendimiento de sacarificación, obtenido a partir de los azúcares liberados respecto el contenido inicial de biopolímeros.

Cuadro 7. Comparativa de la Producción neta de aceite a partir de diferentes métodos de extracción

Compuesto	%
Humedad (%)	16,63
Lignina (%)	40,61
Celulosa (%)	36,96
Hemicelulosa (%)	10,27
Azúcares libres (g/L)	0,00

Fuente: ITENE

La liberación de azúcares fermentables se realizó en dos etapas a escala laboratorio, en las que se estudiaron diferentes condiciones experimentales para definir la combinación de interés. El **alto porcentaje de lignina** en este tipo de muestras las hace más recalcitrantes a la hidrólisis; por ello, se combinaron **estrategias de pretratamiento más energéticas** para hacer la celulosa accesible a las enzimas hidrolíticas. En primer lugar, se llevó a cabo un pretratamiento en autoclave, el cual ablandeció los biopolímeros para facilitar la acción de las enzimas; a continuación, una vez enfriada la reacción, se inició la fase de hidrólisis enzimática, con un contenido sólido del 10%. La combinación de ambas fases es esencial para obtener rendimientos de sacarificación de significativos. Como resultado, se consiguió un **rendimiento** de conversión de **azúcares 2G de ~40%** a partir de residuos de poda, combinando pretratamientos químicos y térmicos (básico, 121°C, 20min), seguido del tratamiento enzimático. Este proceso se escaló hasta un volumen de reacción de 4L, obteniendo 13,69 g/L de azúcares 2G a partir de los cuales se obtuvieron compuestos HVA, como biogás y bioestimulantes microbianos.

3.2 Comparación de la producción neta de biogás

Para producir biogás, es crucial controlar los parámetros del proceso, como el contenido de sólidos total y de sólidos volátiles. El empleo de residuos de poda para producir biogás implica un que estos parámetros operacionales se mantengan constantes, lo que facilita una digestión microbiana más estable. Se estudió la producción de biogás a partir del residuo de poda crudo, así como el hidrolizado del mismo. Los resultados revelaron que se obtiene **una mayor producción neta de biogás** (litros en condiciones normales, NL) a partir de la muestra de hidrolizado (Figura 4), el valor resultante fue **7 veces superior a la producción de biogás a partir de los residuos de poda**¹, tal y como se indica en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Comparativa de la Producción neta de biogás a partir del hidrolizado frente al empleo directamente de residuos de poda

Producción neta de biogás (g/L)	
Residuo de poda	14,3
Hidrolizado	104,8

¹ Este estudio fue realizado por una empresa externa, DRANCO, proveedora de la tecnología de digestión anaerobia y producción de biogás de AWM, gestor de residuos de la ciudad de Munster y socio del proyecto HOOP.

Fuente: ITENE

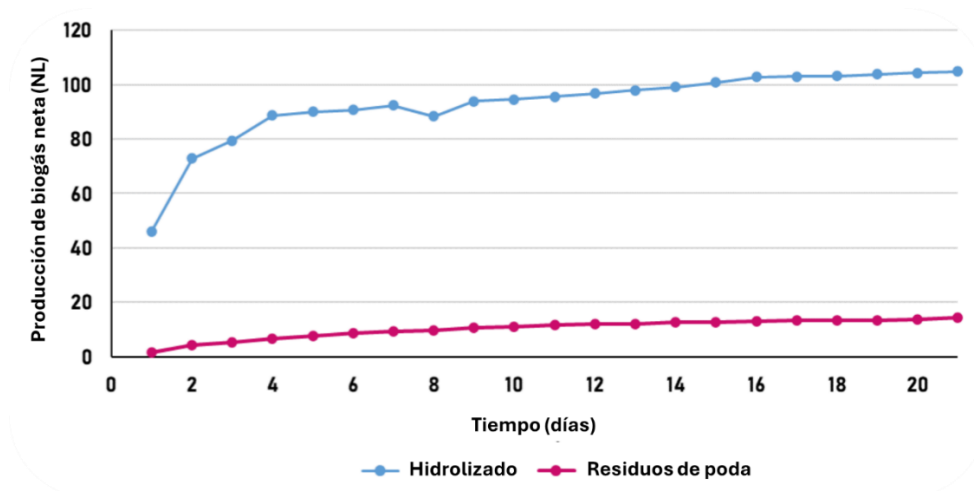


Figura 4. Comparación de la producción neta de biogás con el hidrolizado o a través del residuo de poda. (ITENE)

3.3 Producción de bioestimulantes a partir del hidrolizado de residuos de poda

A partir de los azúcares fermentables liberados en el proceso hidrolítico, se crecieron microorganismos PGP, en concreto, *Azospirillum brasilense*, *Azotobacter chroococcum*, *Rhizobium leguminosarum*, y *Bacillus subtilis*. Se logró un crecimiento de cada especie de **aproximadamente 10^8 UFC/mL en un medio de cultivo compuesto por hidrolizado de residuos de poda verdes sin añadir suplementos**, lo cual es comparable al crecimiento obtenido en medio comercial. Además, se evaluó el potencial de cada especie para promover el crecimiento vegetal *in vitro* a través del estudio de la capacidad de solubilizar fosfato, fijar nitrógeno y producir sideróforos. Como resultado, todas las **bacterias probadas son capaces de fijar nitrógeno en 24 horas, aunque** ninguna de estas bacterias mostró actividad movilizadora de fosfato o productora de sideróforo. Por lo tanto, las 4 especies microbianas son adecuadas para ser aplicadas como bioestimulantes.

La validación de la actividad bioestimulante de los microorganismos cultivados en hidrolizado de residuos verdes se ha evaluado mediante ensayos en macetas, donde la especie vegetal comúnmente conocida como cebada se han cultivado en condiciones ambientales controladas para determinar el efecto de los bioestimulantes microbianos sobre las plantas, en comparación con las plantas no tratadas. Así, semillas de cebada se han sembrado en suelo inerte (turba rubia, vermiculita y perlita) y se regaron con agua que contenía los microorganismos previamente crecidos en el medio **compuesto por hidrolizado de residuos de poda verde sin añadir suplementos**. Las plantas se cultivaron a 25°C con una humedad del 60% y aireación durante 14 días. Los resultados revelaron que la aplicación de los microorganismos en el agua de riego incrementó el contenido en clorofila de las plantas tratadas respecto las controles (Figura 5). Este incremento de clorofila en las plantas corresponde a una mejora en la absorción de

nutrientes, la promoción de la síntesis de hormonas de crecimiento y la reducción del estrés oxidativo como consecuencia de la acción bioestimulante de los microorganismos evaluados. Esto se traduce en un crecimiento más saludable y una mayor capacidad productiva en las plantas, con un impacto directo en el rendimiento y la calidad del cultivo (6).

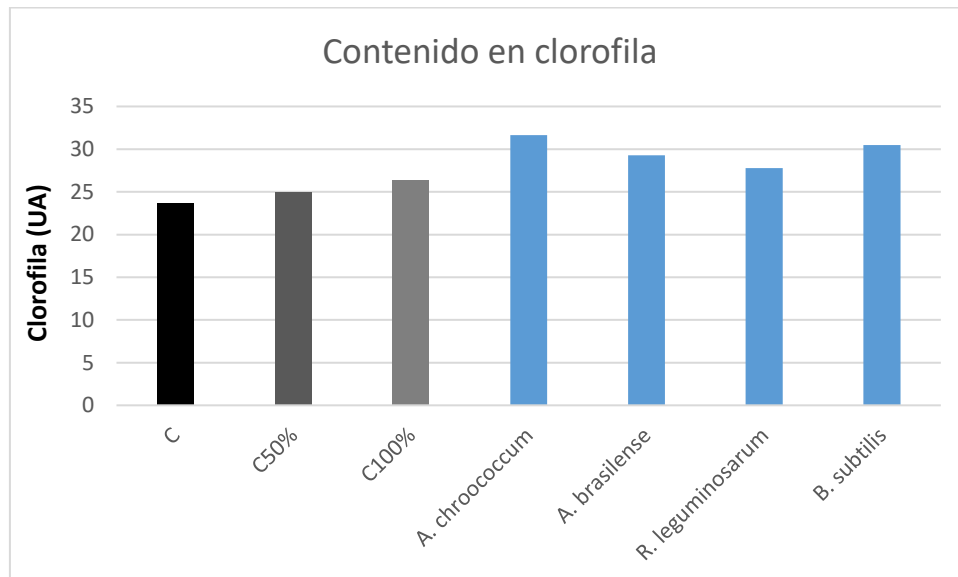


Figura 5. Contenido de clorofila en las plantas tratadas con bioestimulantes microbianos respecto a las plantas sin tratar. C: control. C50%: control tratado con el 50% de las dosis del fertilizante recomendada por el fabricante. C100%: control tratado con el 100% de las dosis del fertilizante recomendada por el fabricante (ITENE)

3.4 Conclusiones

Los residuos de poda de Münster pueden aprovecharse como fuente de azúcares fermentables para la producción de compuestos de valor agregado. El proceso combinado de pretratamientos e hidrólisis enzimática permitió obtener hasta un 40% de conversión de azúcares fermentables.

La producción de biogás a partir de hidrolizado de residuos de poda es técnicamente factible y mejorada en comparación con los residuos verdes no hidrolizados, alcanzando un incremento de hasta siete veces. Esto subraya la importancia de optimizar el proceso y mantener constantes los parámetros operacionales finales, para lograr una digestión microbiana más eficiente y estable en la producción de biogás.

Los hidrolizados de residuos de poda son una excelente materia prima para producir microorganismos PGP, sin necesidad de suplementos adicionales. Este proceso de producción mantiene la capacidad bioestimulante de los microorganismos, los cuales incrementaron significativamente el contenido de clorofila en plantas de hoja verde como la cebada. Para ampliar el estudio de validación de estos bioestimulantes microbianos, sería conveniente determinar el efecto de estos microorganismos crecidos en hidrolizado de poda sobre la

CONAMA 2024

INNOVACIÓN EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE CAFÉ Y DE PODA. EXTRACCIÓN DE
COMPUESTOS DE VALOR AÑADIDO

capacidad productiva de plantas con fruto, lo que potencialmente mejora el rendimiento y la calidad del cultivo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023), Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR)
- [2] Mota, Danyelle & Santos, Jefferson & Faria, Diana & Lima, Álvaro & Krause, Laiza & Soares, Cleide & Ferreira-Dias, Suzana. (2020). Synthesis of Dietetic Structured Lipids from Spent Coffee Grounds Crude Oil Catalyzed by Commercial Immobilized Lipases and Immobilized *Rhizopus oryzae* Lipase on Biochar and Hybrid Support. *Processes*. 8. 1542. 10.3390/pr8121542.
- [3] José P. Coelho, Rui M. Filipe, M. Paula Robalo, Stanislava Boyadzhieva, Georgi St. Cholakov, Roumiana and P. Stateva (2020). Supercritical CO₂ extraction of spent coffee grounds. Influence of co-solvents and characterization of the extracts. *The Journal of Supercritical Fluids*. 161. 104825.
- [4] Christian Cravotto, Anne-Sylvie Fabiano-Tixier, Ombéline Claux, Maryline Abert-Vian, Silvia Tabasso, Giancarlo Cravotto and Farid Chemat (2022). Towards Substitution of Hexane as Extraction Solvent of Food Products and Ingredients with No Regrets. *Foods*. 11 (21). 3412.
- [5] M.A.E. Silva, A.L.M. Brand, F.J.M. Novaes and C.M. Rezende (2022). Cafestol, kahweol and their acylated derivatives: antitumor potential, pharmacokinetics, and chemopreventive profile. *Food Reviews International*. Volume 39, 2023. Issue 9. Pages 7048-7080.
- [6] Melini, F., Melini, V., Luziatelli, F., Abou Jaoudé, R., Ficca, A. G., & Ruzzi, M. (2023). Effect of microbial plant biostimulants on fruit and vegetable quality: current research lines and future perspectives. *Frontiers in plant science*, 14, 1251544.