

Revisión bibliográfica sobre la gestión, el tratamiento y la valorización de los residuos orgánicos procedentes de las actividades agrícolas

**Laura Rodríguez Moyano
2023**

Revisión bibliográfica sobre la gestión, el tratamiento y la valorización de los residuos orgánicos procedentes de las actividades agrícolas

Vº Bº DIRECTOR

Concepción Paredes Gil

ALUMNO



Laura Rodríguez Moyano



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D^a. Laura Rodríguez Moyano**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Revisión bibliográfica sobre la gestión, el tratamiento y la valorización de los residuos orgánicos procedentes de las actividades agrícolas.”, bajo la dirección de D^a. Concepción Paredes Gil, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 19 de junio de 2023

La Directora del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valoración de Residuos Orgánicos

Fdo.: Concepción Paredes Gil

TRIBUNAL
FECHA:
PRESIDENTE: FIRMA:
VOCAL: FIRMA:
VOCAL: FIRMA:

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

IDENTIFICACIONES

Autor: Laura Rodríguez Moyano

Título: Revisión bibliográfica sobre la gestión, el tratamiento y la valorización de los residuos orgánicos procedentes de las actividades agrícolas

Title: Bibliographic review about management, treatment and recovery of organic waste from agricultural activities.

Director/es del TFM: Concepción Paredes Gil

Año: 2023

Titulación: Máster Universitario de Investigación en gestión, tratamiento y valorización de residuos orgánicos.

Tipo de proyecto: revisión bibliográfica

Palabras claves: agricultura, residuo agrario, residuos vegetales, residuos de plásticos, residuos de plaguicidas, composición, tratamiento biológico, tratamiento térmico, subproducto.

Keywords: agriculture, agricultural residue, vegetable residues, plastic residues, pesticide residues, composition, biological treatment, thermal treatment, by-product.

Nº citas bibliográficas: 124

Nº de planos: 0

Nº de tablas: 15

Nº de figuras: 13

Nº de anexos: 0

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis donde se ha intentado englobar los estudios relativos a la gestión, el tratamiento y la valorización de los residuos orgánicos procedentes de la actividad agrícola para así poder presentar unos resultados más detallados. Para ello, se ha realizado un análisis bibliométrico en distintas bases de datos. También se han estudiado los principales residuos de este sector y su evolución en la gestión a lo largo de los años, encontrando distintas opciones que van desde su quema o eliminación en vertedero a la obtención de compuestos de alto valor añadido. Aunque los principales restos de la actividad agraria son de origen orgánico, también se producen plásticos o productos fitosanitarios que requieren una gestión específica. La heterogeneidad de los principales residuos orgánicos producidos hace que según su composición sea más rentable un tipo y otro de gestión. Los principales tratamientos a los que se someten estos subproductos son tratamientos biológicos como el compostaje para obtener compost, la digestión anaerobia para producir biogás o térmicos como combustión, pirolisis o gasificación para obtener energía por distintos mecanismos. Por último, se realiza un análisis acerca de la obtención de compuestos de alto valor añadido a partir de restos de cultivos, pasando estos de ser considerados residuos a subproductos.

ABSTRACT

The objective of this paper is to carry out an analysis where an attempt has been made to include studies related to the management, treatment and recovery of organic waste from agricultural activity in order to present more detailed results. For this, a bibliometric analysis has been carried out in different databases. The main waste from this sector and its evolution in management over the years have also been studied, finding different options ranging from burning or disposal in landfills to obtaining compounds with high added value. Although the main remains of agricultural activity are of organic origin, plastics or phytosanitary products are also produced that require specific management. The heterogeneity of the main organic waste produced means that, depending on its composition, one type of management is more profitable than another. The main treatments to which these by-products are subjected are biological treatments such as composting to obtain compost, anaerobic digestion to produce biogas, or thermal treatments such as combustion, pyrolysis or gasification to obtain

energy through different mechanisms. Finally, an analysis is carried out on the obtaining of high added value compounds from crop residues, turning these from being considered residues to by-products.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Producción agraria	1
1.2. Residuos agrícolas	4
1.3. Jerarquía en la gestión de residuos.....	8
1.4. Legislación aplicable a la gestión de residuos	10
2. Objetivos	16
3. Revisión bibliográfica. Análisis bibliométrico.....	16
4. Gestión actual de residuos agrarios	20
4.1. Gestión de residuos plásticos	21
4.2. Sistema integral de gestión de residuos fitosanitarios	23
4.3. Otros sistemas integrales de gestión	25
5. Composición de los residuos de cultivos	25
5.1. Características de los residuos cerealísticos	26
5.2. Características de los residuos hortícolas	27
5.3. Características de los residuos oleaginosos	28
5.4. Características de los residuos leñosos	29
6. Gestión y tratamiento de los residuos de cultivos	32
7. Métodos de eliminación de los residuos de cultivos	33
8. Tratamientos biológicos de los residuos de cultivos.....	35
8.1. Compostaje	35
8.1.1. Características de los residuos a compostar	36
8.1.2. Proceso de compostaje.....	38
8.1.3. Sistemas de compostaje	39
8.1.4. Té de compost.....	40
8.2. Digestión anaerobia	41
8.3. Obtención de biocombustible	44

9.	Tratamientos térmicos de los residuos de cultivos.....	46
9.1.	Combustión o incineración para obtener energía.....	47
9.2.	Gasificación	49
9.3.	Pirólisis	51
10.	Obtención de compuestos de alto valor añadido a partir de residuos de cultivos	56
11.	Conclusiones.....	57
12.	Bibliografía	58

1. Introducción

El sector agrícola tiene importantes retos que afrontar en el siglo XXI, entre los que destaca la gestión adecuada de los residuos orgánicos generados de las prácticas agrícolas. El aumento de la población y las actitudes de los consumidores y el consumo masivo de bienes y servicios provocan un aumento de la producción de alimentos y con ello, también de residuos agrícolas. De este modo, los residuos procedentes de los cultivos ocupan un espacio cada vez mayor en los suelos y en las instalaciones donde se producen y también en los vertederos. La gestión no adecuada de estos residuos representa una pérdida de recursos valiosos y un problema medioambiental (Esparza et al., 2020).

Los componentes principales de los flujos de residuos del sector agrícola comprenden celulosa, lignina, fibra, carbohidratos, polisacáridos y proteínas de origen vegetal. Diferentes técnicas se han desarrollado para el tratamiento de estos residuos tales como, el compostaje, la digestión anaerobia y tratamientos térmicos para su valorización energética. Actualmente, hay un gran énfasis en la obtención de productos de alto valor añadido a partir de los flujos de desechos agrícolas como, solventes orgánicos, combustibles, compuestos medicinales, biopolímeros, proteínas, etc. Por lo tanto, el aprovechamiento de los residuos agrícolas se encuadra dentro del concepto de economía circular (Mettu et al., 2020).

De acuerdo con la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, se entiende como residuo cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención de desechar y como residuo agrario y silvícola aquellos generados por las actividades agrícolas, ganaderas y silvícolas.

Muchos de los residuos agrícolas pueden ser considerados como subproductos. La ley anterior define también subproducto como *sustancia y objeto resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia y objeto.*

1.1. Producción agraria

En las Figuras 1 y 2 se muestran los datos encontrados en el Anuario de Estadística del año 2021 (últimos datos disponibles), respecto a la superficie y producción de los principales cultivos en España en una comparativa entre el año 2010 y 2020 (MAPA,

2021). En los cereales en grano, la superficie en hectáreas apenas ha aumentado en la última década. Sin embargo, se producen cerca de 7 millones de toneladas más, siendo Castilla y León la comunidad con mayor producción. El principal destino de estos cereales es la exportación. Además, se producen 12.148.390 toneladas para paja y otras 65.450 para biocombustible.

Si nos centramos en las leguminosas, la superficie cultivable ha disminuido en la última década en casi 100.000 hectáreas. Sin embargo, la producción, aunque irregular en función del año, se mantiene similar a 2010. Generándose unas 122.000 toneladas de paja.

La superficie dedicada a los tubérculos en España (patata, batata, boniato y chufa) es de 69.873ha con una producción de 2.164.461 toneladas (2.051.833 patata, 6.270 batata, 96.150 boniato y 10.208 chufa).

Otro cultivo importante de nuestro país es la remolacha azucarera. La superficie cultivada se ha reducido casi a la mitad en los últimos años, sin embargo la disminución de toneladas solamente ha sido de un millón. Su destino en 2020 fue de 319.000 toneladas para producir azúcar y 176 bagazo.

La superficie dedicada al algodón se ha mantenido estable en la última década, pero su producción se ha visto incrementada de manera considerable, llegando casi a duplicar la cantidad de toneladas producidas. Este cultivo se da exclusivamente en la Región de Murcia y la Comunidad de Andalucía.

En la producción de girasol, tanto las hectáreas como las toneladas producidas, tienen poca variación en los 10 últimos años. Las únicas CCAA que no presentan este cultivo son Galicia y Canarias.

Por último, el suelo dedicado a cultivos industriales en nuestro país es de 16.874 ha con un rendimiento de 46.595 toneladas.

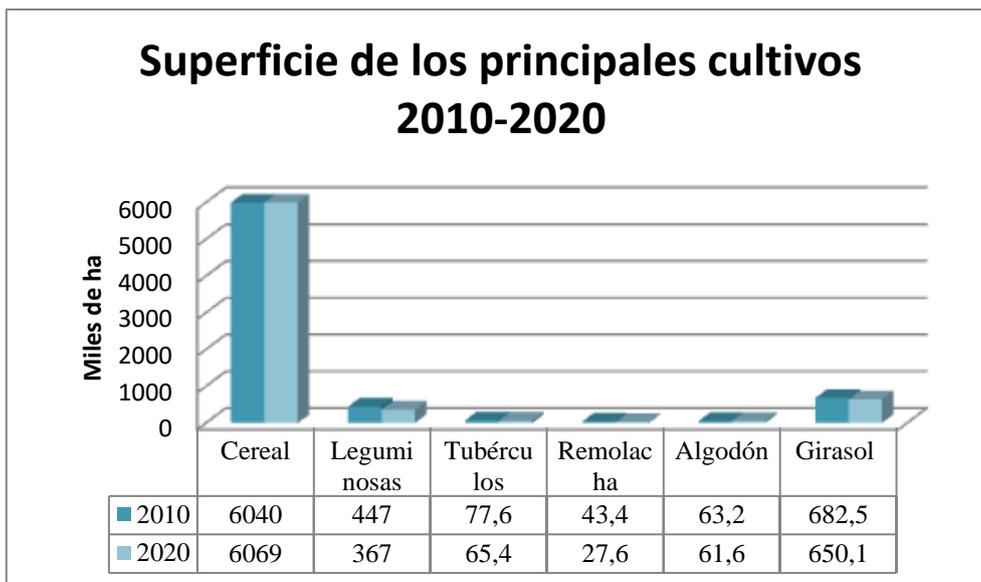


Figura 1: superficie de los principales cultivos, comparativa 2010-2020.
FUENTE: elaboración propia (datos obtenidos del Anuario de Estadística del año 2021 (MAPA, 2021))

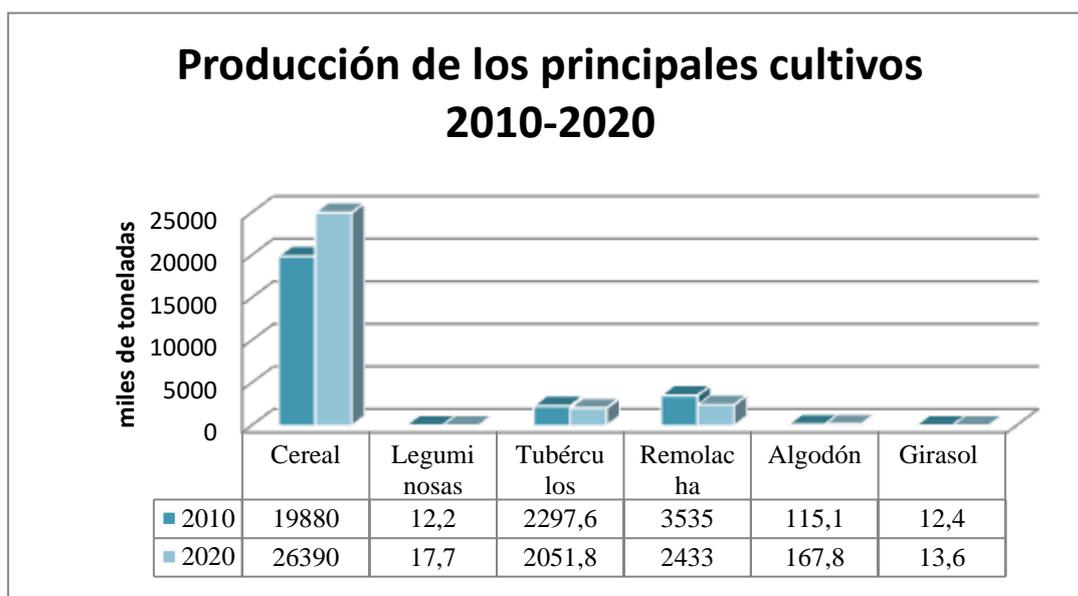


Figura 2: producción de los principales cultivos, comparativa 2010-2020.
FUENTE: elaboración propia (datos obtenidos del Anuario de Estadística del año 2021 (MAPA, 2021))

Tanto en la Unión Europea (UE) como en España los principales cultivos son los cerealísticos, destacando en España la producción de cebada por encima del resto de cereales (Tabla 1). Dentro de los cultivos hortícolas, la producción de patata es importante tanto a nivel europeo como nacional. En cuanto a los cultivos oleaginosos, en España destaca la producción de algodón, mientras que en Europa la mayor producción de este tipo de cultivos es sustentada con la producción de girasol. Debido a la variedad climática y condiciones ambientales de nuestro país, se encuentran

diferencias en cuanto al cultivo predominante con respecto a Europa. De todos estos datos, podemos observar que España es un país destacado en la UE en la producción de cultivos predominantes en los estados miembros. Esta alta producción de cultivos lleva al sector agrario a generar gran cantidad de residuos que deben ser gestionados adecuadamente.

Tabla 1: Producción de cultivos en UE y en España en el año 2020.
FUENTE: elaboración propia (datos FAOSTAT (2023) y MAPA (2021))

	CULTIVO	PRODUCCIÓN UE	PRODUCCIÓN ESPAÑA
CEREALES	Trigo	126.378.690	7.817.060
	Cebada	54.681.820	10.955.780
	Maíz	66.998.030	4.214.102
	Avena	8.523.960	1.323.815
	Centeno	8.938.870	391.680
HORTÍCOLAS	Remolacha azucarera	10.0861.300	319.147
	Patatas	52.873.910	2.051.833
OLEAGINOSOS	Girasol (semilla)	9.025.850	3.025
	Algodón	1.212.503	30.758
	Soja	2.974.492	1.663

1.2. Residuos agrícolas

La mayoría de residuos generados en el sector agrario de forma directa son de naturaleza orgánica o biodegradable (Tortosa, 2009).

La mala o nula gestión de los residuos orgánicos procedentes de la agricultura puede provocar problemas con incidencia directa en el medio ambiente como emisión de lixiviados, gases o inestabilidad y asentamiento de las cantidades de residuos u otros

impactos que afectan también a la sociedad como pueden ser olores, suciedad, plagas, impacto paisajístico...

Debido a la heterogeneidad de estos residuos, encontramos características y proporciones diferentes en cuanto a su composición: poseen humedad variable, relación C/N o compuestos volátiles que pueden utilizarse luego para otros fines (características que se analizarán más adelante en el apartado 5 sobre composición de los residuos de cultivo).

Los residuos se generan de forma desigual en las distintas comunidades. Cataluña y Madrid producen restos vitícolas, oleico, horticultural y frutal. La horticultura también destaca en la Región de Murcia, Canarias, Baleares, Comunidad Valenciana y Andalucía. Esta última recoge, además, el 80% de los olivares y el 90% de la producción de algodón de la península. Castilla y León producen gran cantidad de cereal, girasol y remolacha. En la Comunidad Foral de Navarra y en la de Extremadura predominan los cereales y frutales (Pérez Murcia y Pérez Espinosa, 2021).

Debido a que el cultivo de mayor importancia en nuestro país es el cereal, se produce una gran cantidad de paja como residuo, 12.148.390 toneladas (Anuario de estadística, 2021), que deben ser gestionadas correctamente, puesto que, actualmente, está prohibida su quema.

La paja generada en los cultivos cerealísticos oscila entre 1,4 y 4,3 toneladas por hectárea. Los denominados industriales producen restos lignocelulosos, que varían entre 1 a 10 toneladas por hectárea. Todos los cultivos que requieren de poda anual, producen una gran cantidad de residuo herbáceo que oscila desde las 1,7 toneladas en el melocotón a las 5,33 en el manzano (Cuadros, 2008).

Se generan unos 27 millones de toneladas de residuos totales procedentes de cultivos agrícolas. El 58% proceden de la poda de frutales, 35.7% restos cerealísticos y algo menos del 6% de cultivos industriales (Cuadros, 2008).

En la Guía de Técnicas de Gestión Ambiental de Residuos Agrarios, se proponen dos caminos para la reutilización o gestión de distintos restos vegetales y paja. Pretenden, en origen, reutilizarlos con otros fines y, cuando esto no sea posible, como combustible (Solé Mauri, Flotats, Ripoll, 2004).

Como se puede observar en la Tabla 2, el mayor residuo de los principales cultivos de nuestro país lo encontramos, en proporción, en los tallos de algodón, con una RPR=2,775. También vemos que, en el residuo paja, las proporciones de RPR son iguales en todos los cultivos cerealísticos y arroceros (los principales cultivos de nuestro país) y algo más elevado en la soja y el cacahuete (que se producen en menor medida).

Si tenemos en cuenta los datos de RPR de la Tabla 2, obtendríamos, para los principales cultivos en España, utilizando la media de PRP de los distintos grupos de cultivos (paja generada por todos los cereales, leguminosas, tallos de tubérculos, hojas en la remolacha, tallos de algodón y paja generada por el girasol), los datos obtenidos en la Tabla 3.

Tabla 2: Relación residuo producido/producción de cultivo de los principales cultivos.
FUENTE: (López López y Boluda Hernández, 2008; Bernal Calderón y Gondar Bouzada, 2008).

Cultivo	Residuo	RPR
Trigo	Paja	1,750
Arroz	Paja	1,757
	Cascara	0,267
Cebada	Paja	1,750
Maíz	Tallos	2,000
	Mazorca	0,273
	Cascara	0,200
Centeno	Paja	1,750
Avena	Paja	1,750
Mijo	Tallos	2,00
Triticale	Paja	1,36
Remolacha azucarera	Hojas	0,83
Patatas	Tallos	0,28
Vid	Poda	0,43
Cítricos	Poda	0,07
Guisante seco	Paja	1,00
Guisante verde	Tallo y hojas	0,46
Almendro	Poda	3,17
Colza	Paja	1,86
Olivo	Poda	1,13
Girasol	Paja	2,00
Soja	Paja	2,500
	Vaina	1,000
Cacahuete	Paja	2,300
	Cascara	0,477
Algodón	Tallos	2,775

Tabla 3: relación PRP de los principales cultivos españoles en los años 2010-2020 (últimos datos disponibles).
FUENTE: elaboración propia

Cultivo	PRP	2010 (miles toneladas)	2020 (miles toneladas)
Cereal	1,75	34.790	46.390
Leguminosa	0,75	9,15	13,27
Tubérculo	0,28	643,33	574,51
Remolacha	0,83	2.934,05	2.019,39
Algodón	2,77	319,40	465,65
Girasol	2,0	24,8	27,2

Otro tipo de residuos que se generan como complemento a esta actividad son residuos fitosanitarios (productos y envases), plásticos agrarios (láminas y envases) y otro tipo de residuos no reciclables (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012).

El avance de las tecnologías y técnicas de cultivo han transformado la producción agraria, ocasionando la aparición de kilómetros de invernaderos. Las cubiertas de estos han pasado de ser de cristal o vidrio a sustituirse por materiales plásticos. Esta forma de producción, se ha convertido en el principal problema de generación de residuos no orgánicos en el sector agrícola. En el año 2015, el 40% de la producción de plásticos provenía de este tipo mientras que el 32% de desechos de regadíos (Chávez Santana, 2020).

Se considera que, sin contar los envases, la agricultura consume el 5% de los plásticos totales, 61.000 toneladas en la producción vegetal. El 57% son Polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE) y el 33% cloruro de polivinilo (PVC). Actualmente, se está empezando a implantar, cada vez más, el uso de plásticos biodegradables (Arroyo Perez, n.f.).

1.3. Jerarquía en la gestión de residuos

El principal problema de la gestión de residuos radica en la propia generación de estos. Por este motivo, se incluyó una jerarquía de gestión de residuos donde la primera prioridad es evitar su aparición.

La ley 7/22 incluye en su artículo 8 (coincidente con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y

por la que se derogan determinadas Directivas) de jerarquía de residuos que “las administraciones competentes, en el desarrollo de las políticas y de la legislación en materia de prevención y gestión de residuos, aplicarán para conseguir el mejor resultado ambiental global, la jerarquía de residuos por el siguiente orden de prioridad: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otro tipo de valorización incluida la energética y eliminación”.

Una vez generados, la primera opción es su reutilización para evitar que estos se conviertan en residuos como tal y poder usarlos o reintroducirlos en el mercado como subproducto. Si esto no fuera posible, debe procederse al reciclado, es decir, una transformación física o química del material para que este pase de ser considerado residuo a producto. Por último, cuando ninguna de estas opciones es posible, se procede a la valorización energética, que consiste en la utilización de estos residuos para la producción de energía utilizándolo como combustible (Galera, 2014).

La ley 7/2022, en su artículo 4 también recoge la definición de subproducto, entendiéndolo como “una sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto”.

En su artículo 2, aclara distintas definiciones relativas a la gestión de residuos:

- Eliminación: cualquier operación que no sea la valorización.
- Gestión de residuos: la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la clasificación y otras operaciones previas; así como la vigilancia de estas operaciones y el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos. Se incluyen también las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.
- Preparación para la reutilización: la operación de valorización consistente en la comprobación, limpieza o reparación, mediante la cual productos o componentes de productos que se hayan convertido en residuos se preparan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa y dejen de ser considerados residuos si cumplen las normas de producto aplicables de tipo técnico y de consumo.
- Prevención: conjunto de medidas adoptadas en la fase de concepción y diseño, de producción, de distribución y de consumo de una sustancia, material o

producto, para reducir la cantidad, los impactos o el contenido de sustancias peligrosas.

- Valorización: cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.

La ley 7/22 pretende integrar la gestión de residuos en España dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la economía circular. Para ello, en el título VII incluye medidas fiscales para incentivar la economía circular.

Dentro de los ODS, la jerarquización de la gestión de residuos se puede vincular a:

- ODS nº 6, agua limpia y saneamiento: la mala gestión de residuos genera contaminación de las aguas de consumo humano.
- ODS nº7, energía asequible y no contaminante: una de las opciones de gestión que plantea la ley 7/22 es la valorización energética, obteniendo energía mediante la eliminación de una posible fuente de contaminación.
- ODS nº 11, ciudades y comunidades sostenibles: evitar la generación del residuo y un consumo responsable convierte las urbes en comunidades sostenibles a nivel ambiental.
- ODS nº 12, producción y consumo responsable.
- ODS nº 15, vida de ecosistemas terrestres: la mala gestión de residuos genera contaminación de los ecosistemas.
- ODS nº17, alianzas para lograr los objetivos: un cambio en la legislación, impulsa la consecución de estos ODS.

1.4. Legislación aplicable a la gestión de residuos

El tratamiento y la gestión de los residuos agrarios se rigen por la legislación existente, tanto europea como nacional. Además, muchas de las comunidades poseen la suya propia.

La primera mención a una legislación de residuos se encuentra en la Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos, con la finalidad de proteger la salud del hombre y el medio ambiente a través de un régimen jurídico comunitario para la gestión de residuos. Esta directiva es modificada años después por la “Directiva Marco” (Directiva 91/156/CEE) donde, además, de regular la eliminación y valorización de residuos, se establecen todas aquellas medidas encaminadas a la limitación en la producción de residuos. Posteriormente, en el año 2001, se aprueba el Sexto Programa de Acción Comunitaria en Materia de Medio Ambiente (aprobado con el nombre oficial de “Medio ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos”). Dos años después, en la Comunicación de la Comisión de 27 de mayo de 2003 se pretende llevar a los estados miembros de la Unión Europea “Hacia una estrategia temática para la prevención y el reciclado de residuos”.

En cuanto a la legislación europea, actualmente encontramos la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008. En ella, se establece la jerarquía de residuos: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización con otros fines y eliminación. Distingue entre residuo y subproducto y especifica que la gestión de los residuos se debe llevar a cabo sin crear riesgos en los ecosistemas.

Actualmente, se complementa con la actualización de la Directiva de modificación (UE) 2018/851, donde aparecen nuevos términos como valorización, biorresiduo o prevención de residuos y por la Decisión Delegada (UE) 2019/1597 para establecer una medición uniforme de los residuos alimentarios.

También sería vinculante la Decisión de la comisión de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, donde nos definen distintos tipos de residuos, se hace una clasificación en función de sus características y se presenta una lista según su procedencia. En este caso, se corresponderían con la clasificación 02, “*Residuos de agricultura, horticultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos*”.

La Lista Europea de Residuos (LER), se encuentra recogida en la Decisión 2000/532/EC del 3 de mayo de 2000, cuya última modificación se realizó con la

Decisión 2014/955/UE. La LER fue transpuesta a la legislación española por la Orden MAM/304/2002, derogada por la Ley 7/2022. Esta lista clasifica, mediante códigos de seis cifras, los residuos (Tabla 4). Los procedentes de agricultura, se engloban en el LER 020103 se denominan “Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca: residuos de tejidos vegetales”. Igualmente, en el LER 020104 se incluyen los residuos plásticos (aquellos utilizados en agricultura) y el LER 020108 hace referencia a los residuos agroquímicos que contienen sustancias peligrosas. También, los residuos agrícolas se pueden clasificar según la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) establecida en el Real Decreto 475/2007.

Tanto la clasificación en función de sus características y procedencia como su LER se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Clasificación de los residuos según la Lista Europea de Residuos (LER).

FUENTE: elaboración propia

CNAE	LER	Descripción
01.1 Cultivos no perennes (cereales, arroz, hortalizas...)	02 01	Residuos de la agricultura, horticultura, silvicultura, caza y pesca
	02 01 03	Residuos de tejidos vegetales
0.1.2 Cultivos perennes (vid, cítricos, frutos oleaginosos...)	02 01 04	Residuos de plásticos (excepto embalajes)
	02 01 08	Residuos de agroquímicos que contienen sustancias peligrosas
	02 01 09	Residuos agroquímicos distintos de los mencionados en el código 002 01 08
01.3 Propagación de plantas	02 01 10	Residuos metálicos
	02 01 99	Residuos no especificados en otras categorías
01.5 Producción agrícola combinada con la producción ganadera		
01.6 Actividades de apoyo a la agricultura, a la ganadería y de preparación posterior a la cosecha		
02.1 Silvicultura y otras actividades forestales	02 01	Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca
	02 01 03	Residuos de tejidos vegetales
	02 01 04	Residuos de plásticos (excepto embalajes)
02.3 Recolección de productos silvestres, excepto madera	02 01 07	Residuos de la silvicultura
	02 01 08	Residuos de agroquímicos que contienen sustancias peligrosas
	02 01 09	Residuos agroquímicos distintos de los mencionados en el código 002 01 08
	02 01 99	Residuos no especificados en otra categoría

La principal legislación nacional que rige la gestión de residuos agrarios es la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Aquí se recogen las definiciones básicas relativas a dicha actividad, procedimientos y como integrar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030 en ellos.

El último marco general de gestión de residuos a nivel nacional está contemplado en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) de 2016-2022, que coordina las distintas administraciones y mejora la comunicación y sensibilización para garantizar la protección del medio (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], s.f.).

Si contemplamos en la gestión de residuos agrarios el empleo de residuos vegetales para la elaboración de enmiendas orgánicas, sustratos para cultivo sin suelo, enmiendas orgánicas y sustratos para cultivo sin suelo para agricultura ecológica. Además, el empleo de estos residuos para la fabricación de embalajes de madera, la eliminación de este tipo de residuos en vertedero y su incineración o co-incineración. La legislación que regula estos destinos para este tipo de residuos es la siguiente:

- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes (última modificación Orden APA/104/2022)
- Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE.
- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo (última modificación Orden PRA/1943/2016).
- Reglamento de Ejecución (UE) 2021/1165 de la Comisión de 15 de julio de 2021 por el que se autorizan determinados productos y sustancias para su uso en la producción ecológica y se establecen sus listas (última modificación Reglamento de Ejecución (UE) 2023/121).
- Decisión (UE) 2022/1244 de la Comisión de 13 de julio de 2022 por la que se establecen los criterios de la etiqueta ecológica de la UE aplicables a los sustratos de cultivo y las enmiendas del suelo.
- Orden APA/1299/2019, de 18 de diciembre, por la que se modifica la Orden AAA/458/2013, de 11 de marzo, por la que se establece la norma técnica fitosanitaria que deben cumplir los embalajes de madera y se regula el régimen de autorización y registro de los operadores de embalajes de madera.
- Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, por el que se controlan los residuos agrarios cuyo destino sea su depósito en vertedero.

- Real Decreto 1055/2022, de 27 de diciembre, de envases y residuos de envases
- Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos (última modificación Directiva 2018/850/UE).
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. Esta normativa incluye las medidas a adoptar en las actividades de incineración y coincineración de residuos.
- Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación) la incineración y coincineración de residuos. Esta normativa incluye la prevención y control de la contaminación en la incineración y coincineración de residuos.

Dentro de los residuos agrícolas, también se encuentran los residuos metálicos, residuos de agroquímicos y residuos de plásticos (plásticos de invernaderos, residuos de envases de agroquímicos, etc.) generados durante esta actividad. La normativa que regula la gestión de estos residuos es la siguiente:

- Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios (última modificación Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios).
- Directiva 2009/128/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas.
- Real Decreto 1055/2022, de 27 de diciembre, de envases y residuos de envases por la que se regulan los envases utilizados en agricultura.
- Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases, incluyendo los envases de plástico.
- Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular que engloba la gestión de residuos de diferentes tipos en una única ley, tales como los residuos metálicos y de plásticos.

2. Objetivos

El objetivo general de este Trabajo Fin de Master es hacer una revisión bibliográfica de la documentación existente en cuanto a gestión de residuos agrícolas.

Los objetivos específicos son:

- Analizar la bibliografía relativa a las diferentes opciones de gestión de los principales residuos agrarios de origen vegetal generados y de residuos plásticos y de fitosanitarios.
- Estudiar los datos existentes en cuanto a la composición de los principales residuos vegetales procedentes de diferentes estudios y analizar, en función de ello, su gestión más adecuada.
- Revisar los diferentes métodos de eliminación y de tratamientos biológicos y térmicos de los residuos de cultivos, en función de sus características de producción y composición.
- Mostrar la obtención de diferentes compuestos de valor añadido a partir de los residuos de los cultivos, cuando son considerados subproductos.
- Hacer una propuesta de mejora, aplicando las nuevas tecnologías existentes y las necesidades actuales de la sociedad, en la gestión de residuos procedentes del sector agrario.

3. Revisión bibliográfica. Análisis bibliométrico

Las fuentes de información se pueden dividir en diferentes niveles, teniendo en el primer nivel las publicaciones básicas y complementarias disponibles en el ámbito de estudio. En un segundo nivel se encuentran las publicaciones periódicas, tales como, revistas, patentes, avances y revisiones y extractos y resúmenes. El tercer nivel está referido a los libros con las comunicaciones de Congresos y Reuniones Científicas, así como las publicaciones de Grupos de Trabajo de Normalización de métodos. Finalmente, en el cuarto nivel se incluyen las Bases Datos Bibliográficas, que son una colección de registros bibliográficos clasificados por los diferentes campos informativos, de libre acceso o de pago.

En este trabajo se ha realizado una revisión bibliográfica sobre la gestión de los residuos orgánicos agrícolas. Para ello, primeramente se ha hecho un pequeño análisis bibliométrico, consultando distintas bases de datos relevantes sobre este tema.

La revisión bibliográfica se hizo on-line con la búsqueda de documentos en castellano en una base de datos de información abierta como es Dialnet y con la búsqueda de documentos en inglés en una base de datos en la que se requiere licencia de acceso como la Web of Science. Según la base de datos Dialnet, al hacer la búsqueda con la palabra clave “gestión de residuos agrícolas” se obtuvieron con las hay 273 documentos desde el año 1993, correspondiendo 72 de ellos a artículos de revista, 150 a tesis doctorales, 43 capítulos de libros y 8 libros (Figura 3). Únicamente 13 de esos documentos fueron publicados en 2022.

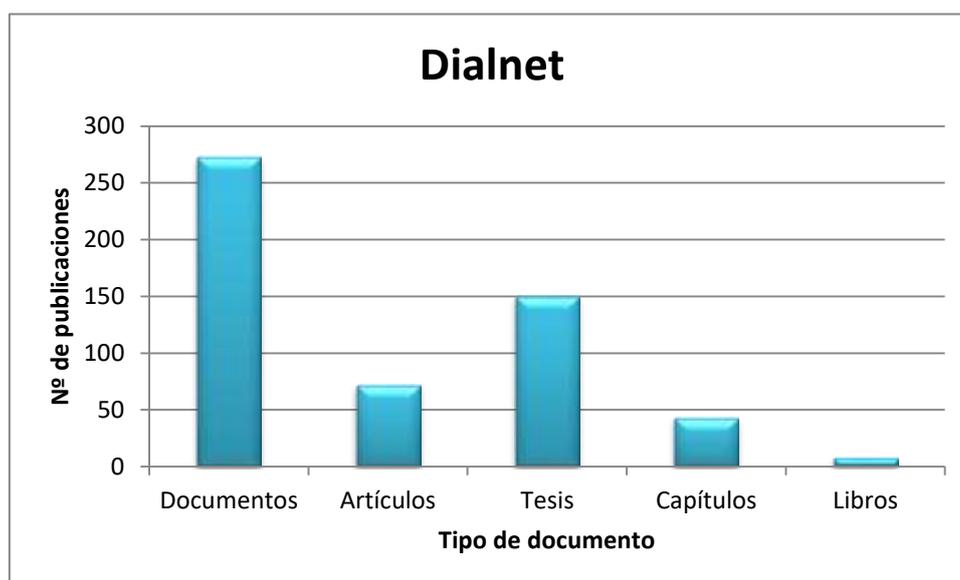


Figura 3: Revisión bibliográfica en Dialnet con el término “Gestión de residuos agrícolas”.
FUENTE: Elaboración propia

En la búsqueda en la base de datos Web of Science con el término “agricultural waste management” obtenemos 18.450 resultados, considerablemente más que en el caso de la plataforma de documentos en castellano Dialnet. Esto nos indica que la mayor parte de la bibliografía relacionada con el tema de estudio se encuentra en documentos en inglés.

Si el periodo de publicación se acota a los últimos 14 años, 2010-2023, se obtienen 15.527 resultados, siendo en los años 2022 y 2021 cuando más artículos aparecen, 2.294 y 2.245 respectivamente. Esto se explicaría por ser los años más recientes, ya que se ve un incremento de documentos según nos acercamos a la actualidad, a excepción de 2023 puesto que es el año en curso (Figura 4).

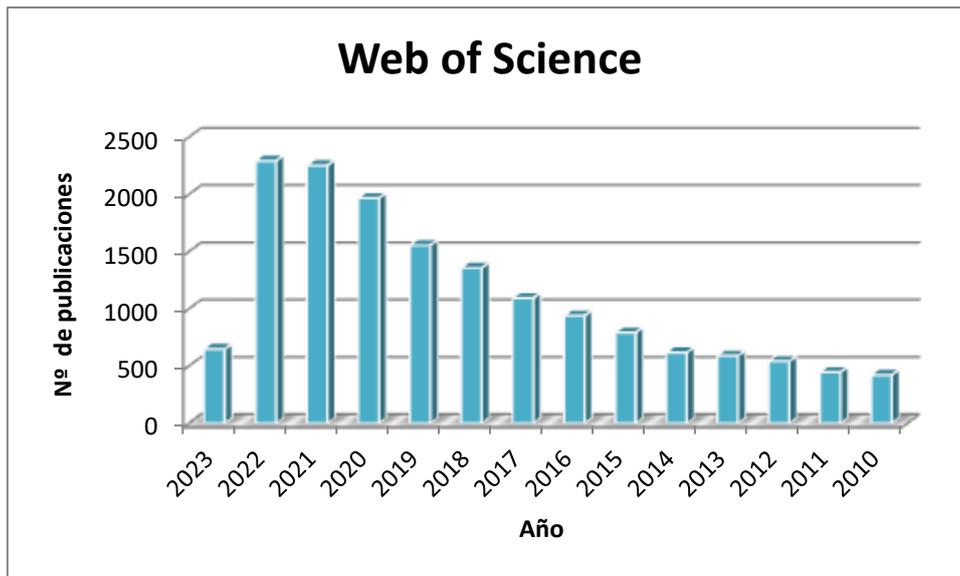


Figura 4: Revisión bibliográfica en "Web of Science" por años.
 FUENTE: elaboración propia

Si en esta misma base de datos hacemos un filtro por países, observamos que China tiene la mayoría de publicaciones, siendo estas 3.567; seguida por USA con 3.250, India con 1.479 y Alemania con un total de 1.164. España se encuentra en sexta posición con 1.094 documentos publicados. Dentro de los países de Europa, aquellos que más documentos han publicado son Alemania, Italia, España en tercer lugar e Inglaterra (Figuras 5 y 6).

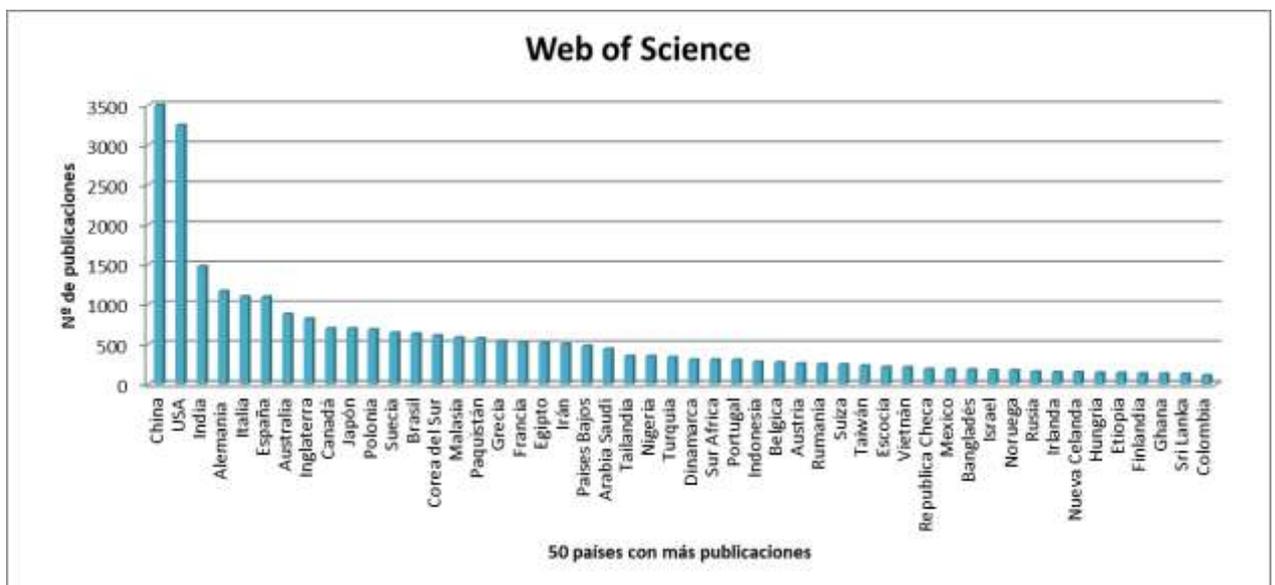


Figura 5: Revisión bibliográfica en "Web of Science" por países, los 50 países con mayor número de publicaciones
 FUENTE: elaboración propia

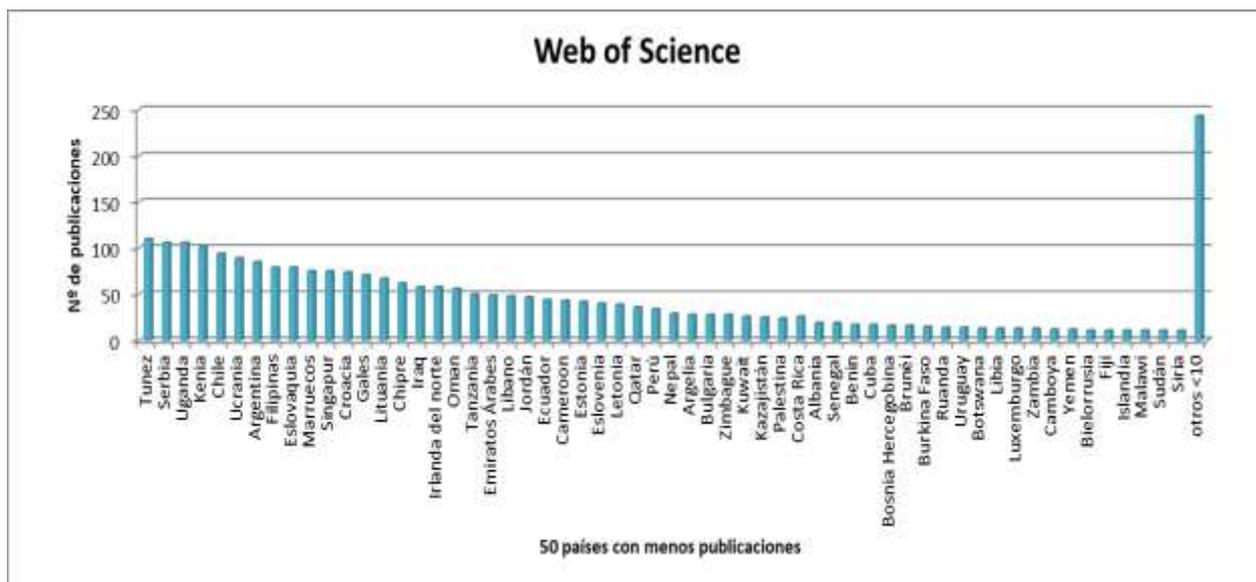


Figura 6: Revisión bibliográfica en “Web of Science” por países, los 50 países con menor número de publicaciones (aquellos países que presentan 10 o menos documentos publicados se han agrupado).

FUENTE: elaboración propia

Analizando el tipo de documento que nos encontramos, 15.066 son artículos y el 9% de artículos son de revisión, documentos muy importantes a la hora de obtener información porque recogen en su contenido gran cantidad de documentos y sus conclusiones son más relevantes. Sin embargo, es de destacar el reducido número de documentos sobre esta temática publicados en libros (Figura 7).

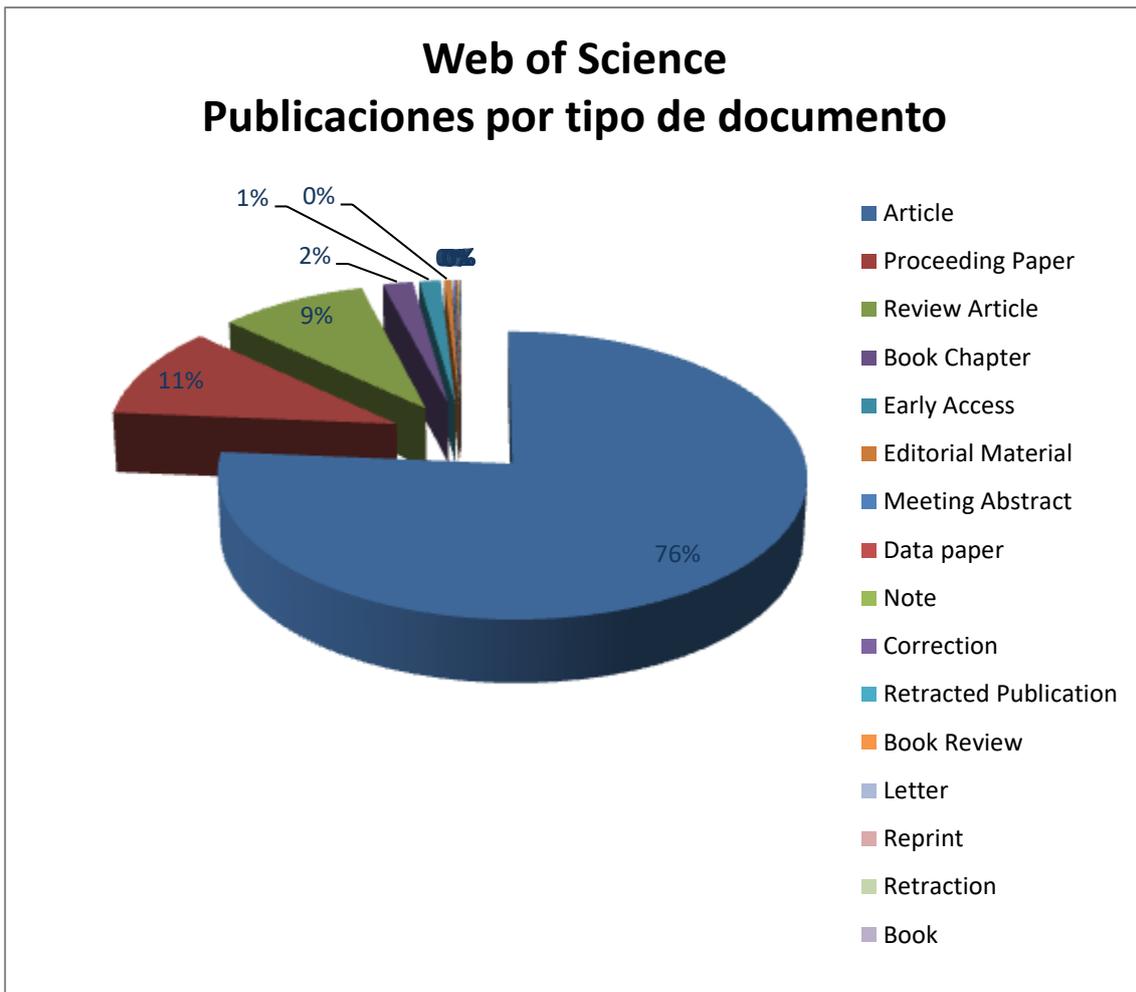


Figura 7: Revisión bibliográfica s en “Web of Science” por tipo de documento.
FUENTE: elaboración propia

4. Gestión actual de residuos agrarios

La aparición de residuos agrarios está ligada al desarrollo tecnológico, obteniendo como resultado de este, tierras de cultivo más extensas y, en consecuencia, una mayor concentración de cultivos.

En periodos anteriores, todo aquello que se producía en agricultura, en pequeñas cantidades, no eran considerados residuos ya que se reutilizaban en la misma explotación. Los principales problemas ocasionados por la mala o nula gestión de residuos agrarios son (Blázquez, 2003):

- Si se amontonan, la humedad y altas temperaturas pueden ser focos de plagas, siendo más recurrentes en restos ricos en azúcares.

- Si se incineran de forma incontrolada, producen contaminación y molestias a la población cercana.
- Si contienen restos fitosanitarios, estos, pueden acabar en la atmosfera (mediante la incineración) o, si se utilizan como alimento para el ganado, ser introducidos en la cadena trófica.

La mala gestión de los residuos agrarios ocasiona problemas a nivel ambiental, agronómico, sanitario, legal, económico, cultural, social, comunicativo, territorial, tecnológico y práctico (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012).

Ya en 1988, Vera y Vega, en su trabajo “Las quemadas de rastrojos y el vacío ganadero en el Valle del Guadalquivir: análisis crítico y propuesta de soluciones” concluye, la necesidad de hacer una correcta gestión de los restos agrarios, siendo estos:

- Aprovechamiento y revalorización de la paja como alimento animal o materia prima en la industria.
- Reintroducir esa materia orgánica en el suelo mediante la trituración de rastrojos o riegos con urea o purines.

Aunque este trabajo solo se centra en los problemas y forma de explotación agraria y ganadera del Valle del Guadalquivir, es extrapolable a todo el territorio nacional. Actualmente, con el avance de la ciencia y la existencia de nuevas técnicas disponibles, hay un abanico más amplio de posibilidades para aprovechar y valorizar este tipo de restos orgánicos.

4.1. Gestión de residuos plásticos

La agricultura genera además de residuos de carácter orgánico, una gran cantidad de plásticos que hay que gestionar.

Delgado et al (2011) define el uso de plásticos en agricultura como plasticultura. Se introdujo en los países desarrollados en la segunda mitad del siglo XX, en los países en vías de desarrollo empezó en los años noventa.

Este tipo de residuos son de origen y producción variable en el territorio español. En el año 2004, en España se generaron unas 235.000 toneladas de plásticos de proveniencias

de la agricultura (Tabla 5). Aproximadamente el 40% de los plásticos generados en el sector pertenecen a cobertura de cultivo (acolchado, tunelillo e invernadero), 32% de tubos y 7% ensilado (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012).

Tabla 5: consumo de plásticos agrarios en EU y España en 2004.
FUENTE: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012)

	Consumo total de plásticos (toneladas)	Plásticos utilizados en agricultura (PUA) (toneladas)	% PUA sobre el consumo total	PUA cultivo protegido (toneladas)	% PUA en cultivo protegido
UE	31.400	850	2,7	400	47,1
España	3.749	235	6,3	94	40,4

Los plásticos generados por esta actividad, son de muy diverso componente, tamaño, grosor, suciedad, color... en todos se pueden generalizar que son de gran volumen y escaso peso. Encontramos que el 57% del total es polietileno (PE) de baja o alta densidad, 33% de policloruro de vinilo (PVC) y un 5,7% de polipropileno (PP). (Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2012).

Los residuos de PE son los más fáciles de reciclar aunque para ello deben estar sin impurezas (tierra o restos orgánicos), con pocos colorantes o sin mezclar con otros plásticos (Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2012).

Los plásticos procedentes de filmes y láminas para protección de cultivo se generan principalmente en Andalucía (86%), Murcia y Canarias (8% en cada una) y Comunidad Valenciana (6%). Normalmente, la entrega de estos plásticos solo conlleva el gasto del transporte (Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2012).

Debido a todos los problemas anteriormente mencionados, se está investigando el uso de materiales alternativos y distintas finalidades para estos materiales.

El Centro Tecnológico de la Agroindustria (Afesva), está investigando el uso de plásticos a base de almidón de maíz para el acolchado de la fresa. Los resultados obtenidos indican que no existen diferencias significativas entre el uso de este tipo de material y el plástico tradicionalmente usado. Al terminar su vida útil, el mulch se puede triturar y ser incorporado al suelo (Sanz, 2012).

En otros países eminentemente agrarios, también se están investigando usos alternativos al plástico. Por ejemplo, en Colombia, se está desarrollando la obtención de un polímero biodegradable a base de almidón de yuca, aunque todavía no se han encontrado evidencias de su uso en campo (Ruiz et al, 2009).

4.2. Sistema integral de gestión de residuos fitosanitarios

Un sistema integral de gestión (SIG) es un sistema diseñado para gestionar adecuadamente, en cuanto a la calidad, medioambiente y salud y seguridad laboral se refieren, los residuos específicos procedentes de una actividad concreta.

Se consideran productos fitosanitarios los plaguicidas, insecticidas, herbicidas y nematicidas, es decir, todos los que contribuyen a la lucha contra las plagas y enfermedades de los cultivos. Del uso de este tipo de productos obtenemos 5 tipos de residuos (siendo los más importantes por volumen y peligrosidad los dos primeros) (Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2012):

- Envases vacíos de los productos.
- Restos de productos que no han sido utilizados.
- Equipos de protección individual (EPIs): mascarilla, guantes, mono...
- Líquidos derivados del enjuague de los envases vacíos.
- Maquinaria de aplicación cuando ha finalizado su vida útil.

Los restos de productos que no han sido utilizados, de acuerdo con la Orden APA/1610/2003 por la que se regula la retirada de los productos fitosanitarios que contengan sustancias activas excluidas de la lista comunitaria, podrán ser almacenados por un máximo de 6 meses en condiciones adecuadas para su conservación y entregados posteriormente a gestores autorizados.

Inicialmente, los residuos plásticos fitosanitarios no seguían una legislación y por tanto su adecuada gestión no era obligatoria. No es hasta el 2001, con el Real Decreto 1416/2001, de 14 de diciembre, sobre envases de productos fitosanitarios (ya derogada) cuando se regulan. Este tipo de envases, debido a las sustancias que contienen, deben ser gestionados adecuadamente para evitar efectos adversos graves tanto en el medio como en las personas.

Actualmente, la gestión de envases plásticos fitosanitarios está regulada principalmente por el Real Decreto 1055/2022, de 27 de diciembre, de envases y residuos de envases, como se indicó en el apartado 1.4. Legislación aplicable a la gestión de residuos.

Otra legislación competente en este campo es:

- Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado
- Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
- Directiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
- Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases
- Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, y por el que se modifica el Reglamento para su ejecución, aprobado por el Real Decreto 782/1998, de 30 de abril.

Los fabricantes y distribuidores, son los encargados de recoger estos envases. Para su adecuada gestión se creó el Sistema de recogida de envases fertilizantes y fitosanitarios (SIGFITO), que es la única sociedad sin ánimo de lucro (SIGFITO Agroenvases S. L.) específica para la gestión de envases fitosanitarios agrarios en nuestro país.

SIGFITO debe poseer una autorización, renovable cada 5 años, en cada comunidad autónoma. Actualmente, opera en todas las CCAA. Esta sociedad debe informar a las autoridades competentes de la cantidad de envases en el mercado, aquellos que son gestionados, los puntos de recogida y el destino de estos residuos (Sistema de recogida de envases fertilizantes y fitosanitarios [SIGFITO], n. d.).

4.3. Otros sistemas integrales de gestión

Aunque SIGFITO es el principal SIG relevante en agricultura (tanto por la peligrosidad que supone la mala gestión de estos residuos como por la cantidad producida) existen otros SIG de relevancia en el sector:

- SIGNUS (Sistema Colectivo de Gestión de Neumáticos Fuera de Uso): es una entidad sin ánimo de lucro que se encarga de recoger, preparar para la reutilización y reciclar neumáticos ya usados (Sistema Colectivo de Gestión de Neumáticos Fuera de Uso [SIGNUS], n. d.).
- TNU (Tratamiento de neumáticos usados): es una sociedad sin ánimo de lucro cuya finalidad es similar a SIGNUS usados (Tratamiento de neumáticos usados [TNU], n. d.).
- ECOPILAS: es un sistema Colectivo de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCRAP) para la gestión de los residuos de pilas y baterías. En agricultura se producen gran cantidad de pilas usadas debido a aparatos de medición, radios o componentes de riego (aunque cada vez se tiende más al uso de baterías portátiles y recargables todavía son una fuente importante de residuos en el sector) usados (ECOPILAS, n. d.).

5. Composición de los residuos de cultivos

La cantidad de residuos de origen agrario generados en nuestro país, junto a la diversidad de cultivos según la zona climática, hacen necesario un análisis de su composición, ya que, en función sus características, lo hacen más idóneo para una u otra finalidad.

Como ya se ha analizado en el apartado 2.3, los principales cultivos de nuestro país y, por tanto, los que mayores residuos generan, se pueden agrupar en cereales, hortícolas y oleaginosos. Su naturaleza diferente, conlleva una composición y características diversas y estas determinaran el tratamiento más conveniente a seguir.

A la hora de hacer una clasificación para estos restos, además de agrupar los tipos de residuos agrarios según el cultivo del que provienen, Sánchez y Sepúlveda (n. d.) los agrupan en función de sus características en el momento de cosechar. Así, podemos encontrar:

- Residuos secos al momento de cosecha: cereales y algunas leguminosas. Presentan baja humedad (10-15%) y nitrógeno (0,3-1,1) y alta cantidad de carbono (37-47%) y materia orgánica (77-85%).
- Residuos verdes al momento de cosecha: residuos de hortalizas o frutales. Presentan alto contenido de humedad y carbono y nitrógeno, entre un 5-15% de hemicelulosa y un contenido variable de celulosa.
- Residuos leñosos al momento de la poda: proveniente de árboles que requieren poda. Presentan un contenido medio-bajo de humedad y una relación C/N muy elevada (mayor de 30).

5.1. Características de los residuos cerealísticos

El principal cultivo, tanto en la UE como en España, son los cereales, destacando el trigo, seguido por otros como maíz y cebada. Otros cereales de importante producción en España son la avena y el centeno. La relación en estos cultivos de residuo producido/producción de cultivo es elevada (1.64 de media). Siendo el principal residuo producido la paja.

Las características en cuanto a composición son muy similares en todos los cultivos cerealísticos. En AgroCompost (2023) podemos encontrar las características relativas a la paja de cereal y a la paja de cereal de trigo, que es la que se produce en mayor cantidad. Valverde-Orozco et al (2022) también analizó las características de distintos restos de cereales (en este trabajo, analiza menos factores que AgroCompost) entre los que destacan el maíz y maíz dulce y la cebada. Estos datos los podemos observar en la tabla 6.

Tabla 6: Características de la paja de cereal y paja de trigo.

FUENTE: elaboración propia, datos obtenidos de AgroCompost (2023); Valverde-Orozco et al. (2022)

	pH	C (%)	N (%)	C/N	Densidad aparente (kg/L)	Conductividad (mS/cm)	P (g/kg)	K (g/kg)	MO (%)	Na (g/kg)	Humedad (%)
Paja	6,70	44,1	1,10	40	0,03	7,13	0,67	22,5	87,9	4,44	24
Paja trigo	8,40	41,8	0,44	96	0,02	3,61	0,02	31,8	87,7	5,31	1
Maíz	6,7	29,5	2,99	43	-	2,05	-	8,0	75,2	-	-
Maíz dulce	6,45	40,9	2,32	18	-	2,3	-	8,0	84,6	-	-
Cebada	6,28	44,7	7,51	6	-	5,2	-	23,0	86,2	-	-

La paja de este tipo de cultivos, aunque variable, se caracteriza, en general, por tener una relación C/N muy alta y una baja humedad (debido a que es un cultivo de secano).

5.2. Características de los residuos hortícolas

Los cultivos hortícolas destacan por ser un grupo más heterogéneo. En nuestro país, tanto por volumen de producción como importancia económica, destacan la remolacha (dando como residuo principal hojas), patatas (dando como residuo principal los tallos). Debido a su heterogeneidad, obtener unos datos medios en cuanto a su composición es complicado. Además, a la hora de utilizar estos residuos, conviene estudiar su composición concreta en función de su procedencia. En la tabla 7, podemos observar los datos de la media de sus características en cuanto a composición, sin embargo, en la tabla 8 encontramos datos más concretos en función del tipo.

Tabla 7: Características de los restos hortícolas.
FUENTE: elaboración propia, datos obtenidos de AgroCompost (2023)

	pH	C (%)	N (%)	C/N	Densidad aparente (kg/L)	Conductividad (mS/cm)	P (g/kg)	K (g/kg)	MO (%)	Na (g/kg)	Humedad (%)
Hortícolas	6,9	45,9	1,02	45	0,04	1,33	0,71	4,18	95,7	1,89	8

Entre los cultivos hortícolas, producidos en los invernaderos destacan el pimiento o el tomate. Los restos de estos y otras plantas hortícolas son ricos en macronutrientes y propiedades biofumigantes (Marín-Guirao et al., 2023). Estos se pueden observar en la Tabla 8:

Tabla 8: Características en composición de restos de distintas plantas hortícolas. (% de nutrientes sobre materia seca). **FUENTE:** elaboración propia, datos obtenidos de Marín-Guirao et al. (2023)

	Materia seca (%)	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Pimiento	16,1	2,87	0,14	3,62	1,53	0,78
Tomate	12,6	1,78	0,39	2,03	2,73	1,20
Melón	10,4	1,33	0,23	2,83	2,10	0,57
Pepino	12,2	1,35	0,19	1,32	2,25	0,45
Judía	14,5	1,71	0,16	0,16	2,95	0,66

5.3. Características de los residuos oleaginosos

De los principales cultivos oleaginosos en nuestro país, obtenemos como residuo paja de colza, girasol y soja, la poda del olivo y tallos procedentes del algodón.

De todos estos residuos, en AgroCompost (2023) encontramos datos referentes únicamente al olivo, tanto restos de poda triturada en olivos de Bacarot como hojas:

hoja seca en Xert y Albocasser (Castellón), hoja en Sant Jordi (Castellón), hoja de olivo ecológico en Bocairent (Valencia), hoja de olivo de cribado de la aceituna en Relleu (Alicante). Estos residuos se caracterizan por tener una elevada relación C/N, debida a sus altos contenidos de carbono orgánico y los bajos contenidos de nitrógeno total, así como, presentan altos contenidos de potasio (Tabla 9).

Tabla 9: Características de restos de olivo de diferentes localidades.
FUENTE: elaboración propia, datos obtenidos de AgroCompost, 2023

	pH	C (%)	N (%)	C/N	Densidad aparente (kg/L)	Conductividad (mS/cm)	P (g/kg)	K (g/kg)	MO (%)	Na (g/kg)	Humedad (%)
Xert	5,6	48,7	1,57	31	0,2	1,17	1,17	5,7	88,5	1,24	10
Sant Jordi	5,6	47,3	1,48	32	0,27	1,2	1,41	4,6	84,8	0,88	14
Bocairent	5,9	51	1,57	32	0,48	1,1	0,47	6,7	90,7	1,31	15
Relleu	5,9	49,8	1,35	37	0,05	2,31	1,25	10,7	91,2	1,63	19
Bacarot	5,2	49,0	1,31	37	0,15	1,82	1,19	10,0	94,9	1,44	15
Albocasser	5,6	48,7	1,67	29	0,25	1,23	1,14	5,6	87,1	0,93	8

5.4. Características de los residuos leñosos

Los residuos leñosos se caracterizan por provenir de la poda de árboles obteniendo palos y restos leñosos. Los principales cultivos leñosos de nuestro país son la vid y frutales tales como cítricos, caqui, granado o almendro.

En AgroCompost (2023) podemos encontrar las características relativas a la poda de vid de distintas localidades españolas donde se produce esta planta: Socuéllamos (Ciudad Real), Ayora (Valencia), Fuente Álamo (Murcia), Monforte del Cid (Alicante), Hondón de las Nieves (Alicante), Villena (Alicante) y Sinarcas (Valencia). Todas ellas,

pertencen a la zona sureste, quedando sin analizar otras importantes zonas vitícolas como son La Rioja o la ribera del Duero. Esto es debido a que AgroCompost está diseñado por la Universidad Miguel Hernández de Elche y toma como referencia la zona meridional de España. Los datos podemos observarlos en la Tabla 10.

Tabla 10: Características de sarmiento de vid en distintas localidades.
FUENTE: elaboración propia, datos obtenidos de AgroCompost (2023).

	pH	C (%)	N (%)	C/N	Densidad aparente (kg/L)	Conductividad (mS/cm)	P (g/kg)	K (g/kg)	MO (%)	Na (g/kg)	Humedad (%)
Socuéllamos	6,1	43,6	0,99	44	0,15	1,55	0,8	5,88	92,8	0,54	12
Vid triturada Ayora	8	35,1	0,67	52	0,19	1,01	1,34	10,2	65,9	1,53	16
Fuente Álamo	7,1	58,2	1,04	55	0,14	1,27	0,7	3,47	92,9	1,44	10
Monforte (ramas 20- 30cm)	5,2	45,9	0,8	57	0,16	3,52	1,35	13,5	94	2,09	50
Hondón de las Nieves	6,3	44,2	0,7	62	0,15	2,52	1,01	7,81	89,8	2,43	8
Villena	6	47,2	0,75	62	0,15	1,59	0,43	5,07	93,1	0,43	7
Sinarcas	5,8	46,2	0,73	63	0,15	1,62	0,07	6,15	96,2	2,06	4

En AgroCompost (2023), también se referencian datos relativos al sarmiento de vid triturada en general. Si estos datos los comparamos con la media de los datos de la Tabla 10, obtenemos resultados muy similares (Tabla 11).

Tabla 11: características de restos de sarmiento de vid.
FUENTE: elaboración propia, datos obtenidos de AgroCompost (2023).

	pH	C (%)	N (%)	C/N	Densidad aparente (kg/L)	Conductividad (mS/cm)	P (g/kg)	K (g/kg)	MO (%)	Na (g/kg)	Humedad (%)
Sarmiento Vid triturada	6,1	46,7	0,63	74	0,13	1,33	0,35	5,95	93,9	1,12	10
Media datos sarmiento vid	6,3	45,9	0,80	58	0,20	1,80	0,80	7,30	89,8	1,50	15

En AgroCompost (2023), también encontramos datos relativos a la poda del almendro, granado (poda de granado en EPSO Orihuela y la localidad de San Juan, poda de granado triturado 3cm en Bacarot y poda de granado sin hojas en San Juan) y caqui. Estos datos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Características de restos de poda de distintas especies leñosas.
FUENTE: elaboración propia, datos obtenidos de AgroCompost (2023).

	pH	C (%)	N (%)	C/N	Densidad aparente (kg/L)	Conductividad (mS/cm)	P (g/kg)	K (g/kg)	MO (%)	Na (g/kg)	Humedad (%)
Almendro	5,2	46,1	1,75	26	0,03	3,64	0,35	19,8	94,1	1,35	24
Granado EPSO	5,0	46,6	0,91	51	0,18	1,62	0,93	5,84	96,7	0,55	16
Granado San Juan	5,3	46,1	0,85	54	0,51	2,00	1,06	7,48	96,3	0,64	20
Granado triturado	5,1	45,9	1,32	35	0,17	2,27	2,05	8,41	95,8	1,53	44
Granado sin hojas	5,3	46,1	0,85	54	0,51	2,00	1,06	7,48	96,3	0,64	20
Caqui	6,3	47,3	1,03	46	0,11	1,54	1,20	5,17	97,1	0,40	14

Del análisis de los datos de la tabla 12, podemos observar que todos tienen unas características en cuanto a composición muy similares. El pH está en torno a 5 y una cantidad de carbono entorno al 45-50%. La cantidad de nitrógeno es, en general, baja. Tienen gran cantidad de materia orgánica y baja humedad.

6. Gestión y tratamiento de los residuos de cultivos

La quema de restos agrarios, como tradicionalmente se venía haciendo, suponía la eliminación de estos restos, ocasionando diversos problemas tanto al medio ambiente como a las personas, pero no su transformación en subproductos.

Actualmente, con el avance de las tecnologías, estos restos pueden pasar de ser considerados residuos a subproductos y a su utilización, mediante la aplicación de tratamientos biológicos, físico-químicos o químicos, en otras industrias.

Un tratamiento biológico supone la exposición del subproducto a la actividad microbiana, realizando estos microorganismos una biotransformación aeróbica o anaeróbica de la materia orgánica, directamente sobre los sustratos o tras un procedimiento de extracción, cuyos productos pueden tener interés comercial como biocombustible o bioproducto. Los principales tratamientos biológicos que se aplican a los residuos del sector agrario son el compostaje, la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia (serán analizados en profundidad más adelante en el apartado 8. Tratamientos biológicos de los residuos de cultivo) (Pérez Murcia y Pérez Espinosa, 2021).

Un tratamiento físico-químico consiste en la aplicación conjunta de tratamientos físicos en primer momento para realizar una separación de los componentes del residuo, normalmente en función de su tamaño o peso, junto con un posterior uso de sistemas químicos para transformar el residuo. Los más utilizados son los tratamientos termoquímicos y la extracción de aceites (serán analizados en profundidad más adelante en el apartado 9. Tratamientos térmicos de los residuos de cultivo). En la Figura 8 se esquematizan las diferentes alternativas para la gestión de residuos de cultivos.

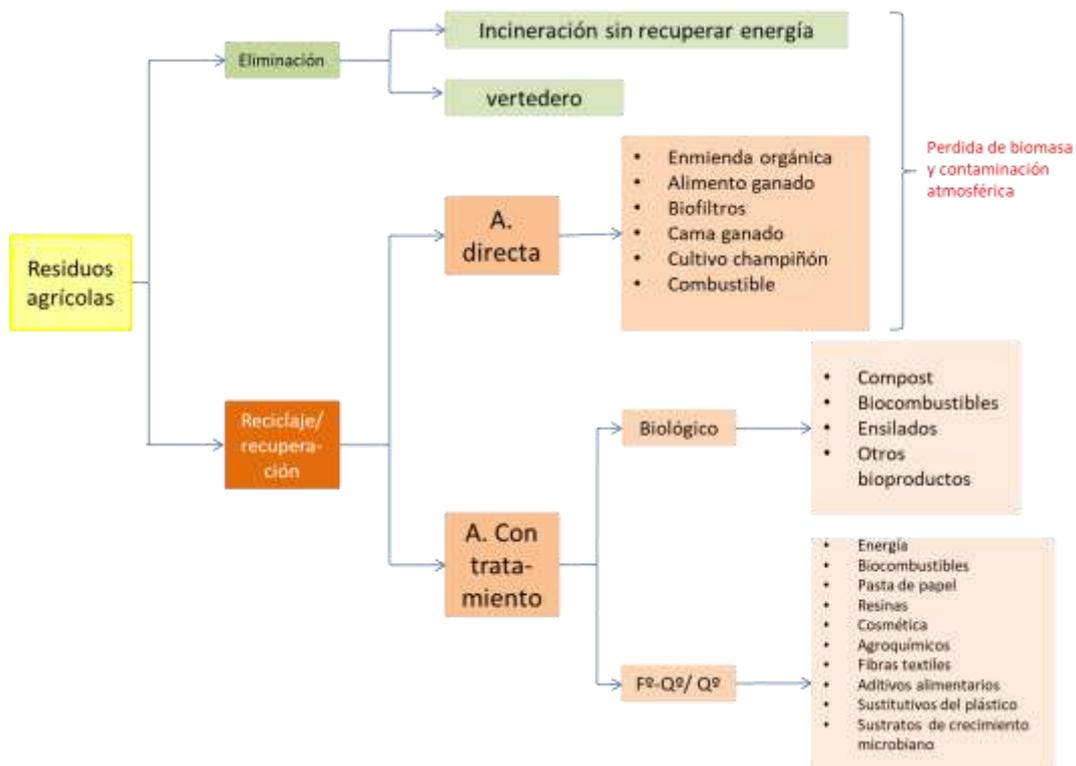


Figura 8: Aalternativas disponibles para el tratamiento de residuos agrícolas.
FUENTE: López y Boluda, 2008

7. Métodos de eliminación de los residuos de cultivos

Tradicionalmente, en nuestro país una de las principales formas de eliminar restos agrarios como rastrojos o restos de paja (procedentes de cultivos cerealísticos principalmente) era proceder a su quema.

Antiguamente, en muchas fincas de explotación agraria, se combinaba el pastoreo post-cosecha con la quema de rastrojos. El aumento de la ganadería intensiva y abandono de la extensiva, junto con otras formas de producción agraria, hizo que la práctica predominante hasta nuestros días sea solo la quema de los restos (Vera y Vega, 1988).

En la actualidad, la quema de rastrojos en España se encuentra prohibida por la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, que establece en el apartado 3 del artículo 27 que “con carácter general, no está permitida la quema de residuos vegetales generados en el entorno agrario o silvícola. Únicamente podrá permitirse la quema de estos residuos con carácter excepcional, y

siempre y cuando cuenten con la correspondiente autorización individualizada que permita dicha quema, por razones de carácter fitosanitario que no sea posible abordar con otro tipo de tratamiento”.

Aunque no ha sido hasta el año 2022 cuando se ha prohibido definitivamente en España, esta práctica agrícola lleva siendo objeto de controversia y discusión algunas décadas.

Ya en 1997, hay estudios sobre los perjuicios que esta práctica puede producir, como el desarrollado por Ortiz de Zarate Isasi (1997). En su tesis “*Estudio del impacto atmosférico producido por la quema de rastrojo*”, estudia el gran impacto que tiene la quema de rastrojos en la atmósfera y concluye que es una importante fuente de emisión de contaminantes, tanto por la cantidad quemada como por el impacto que esto tiene. Los productos finales obtenidos de la incineración son gases calientes de combustión (CO₂, SO₂, CO, NO_x, N₂, O₂, vapor de agua) y cenizas (Galera et al, 2014).

La aplicación de fuego en el suelo facilita la disponibilidad de algunos nutrientes para las plantas, pero también ocasiona una pérdida de materia orgánica en éste. El volumen de pérdida de dicha materia depende de la temperatura que se alcance. Las cenizas, debido a su composición, pueden aumentar el pH y el calcio, magnesio, sodio y potasio asimilable en el suelo pero esta técnica deja al suelo desnudo ocasionando una mayor erosión y evaporación del agua acumulada (González Fernández, 1995).

La erosión del suelo es un agravante a la hora de calificar una zona como desértica, estando hasta el 25% del territorio nacional en esta situación (Yuste Molina, 1996).

La cosecha siguiente a la producción de una quema de los restos del año anterior, presenta depresiones de crecimiento y aspecto amarillento del cereal, debido a las necesidades de nitrógeno en las primeras etapas de crecimiento, siendo deficitario tras una quema o al eliminar el pastoreo del suelo, cuyas deyecciones son ricas en nitrógeno (Vera y Vega, 1988).

Huesca et al (2009) analizan la distribución espacial y temporal de los incendios forestales en España y lo superponen con datos obtenidos del ministerio sobre zonas de uso agrícola (Huesca et al, 2009).

La quema de restos vegetales también ocasiona pérdida de biodiversidad, tardando hasta 6 meses en recuperarse (Iglesias et al, 2000).

Otra forma tradicional de gestionar residuos agrarios es su eliminación en vertederos, regulado actualmente por el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

En su artículo 1 se establece como objeto y finalidad de esta ley “garantizar una reducción progresiva de los residuos depositados en vertedero, especialmente de aquellos que son aptos para su preparación para la reutilización, reciclado y valorización...”.

También, en su artículo 4 se establecen pautas para gestionar los residuos hacia una economía circular como consecuencia de la aprobación el 29 de junio de 2018 del “Plan de Acción para la implementación de la Agenda 2030”, con la finalidad de conseguir los ODS y una economía circular.

Por todo lo expuesto anteriormente, se deduce que los residuos agrícolas son aptos para su reutilización o valorización por distintos procedimientos y por tanto su finalidad no debería ser ni la quema ni la eliminación en vertedero.

8. Tratamientos biológicos de los residuos de cultivos

Un tratamiento biológico de residuos consiste en la utilización de la actividad microbiana, en la que mediante una biotransformación aeróbica o anaeróbica de la materia orgánica, obtenemos productos de interés industrial. Estos procedimientos pueden llevarse a cabo sobre el sustrato mediante compostaje o biometanización o bien mediante extracción.

8.1. Compostaje

El compostaje se define como un proceso de descomposición y estabilización biológica aerobia, bajo condiciones controladas, obteniendo como producto final CO₂, H₂O, minerales y compost. Este proceso pasa por una primera fase termófila, o de descomposición de la materia orgánica y una segunda fase de maduración. El compost es el material obtenido mediante compostaje que presenta materia orgánica estabilizada, libre de sustancias fitotóxicas y agentes patógenos (Onwosi et al., 2017).

La elaboración de compost para su empleo agrícola está regulada en la normativa española por el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes

(última modificación Orden APA/104/2022) y el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo (última modificación Orden PRA/1943/2016). Estas normativas especifican los criterios generales y la limitación en cuanto a presencia de patógenos y metales pesados que puede tener.

Desde un punto de vista ambiental, la principal ventaja del compostaje es la transformación y eliminación de residuos dando en su lugar materias utilizables en agricultura.

Otros beneficios del uso del compost son (Negro et al, 2000):

- Acondicionamiento del suelo: el uso de compost en el suelo sirve de sustitutivo para otras materias utilizadas con el mismo fin, como la turba que es una materia no renovable. Además, la materia orgánica del compost aumenta la fertilidad del suelo.
- Mejora la aplicación al suelo: sustituyendo el compost a materiales tradicionalmente usados como el estiércol, siendo el primero más estable y con menores efectos adversos (patógenos, producción de malos olores...).
- Disminuye riesgo de contaminación o malos olores.
- Destrucción de patógenos: las altas temperaturas del proceso de compostaje eliminan la mayoría de patógenos.
- Producto vendible: el compost es fácilmente reproducible y vendible.

8.1.1. Características de los residuos a compostar

Para que el proceso de compostaje tenga éxito, los residuos utilizados deben tener unas características concretas, difíciles de conseguir al tratarse de residuos y no materias originales.

Entre los parámetros físicos del residuo hay que tener en cuenta el tamaño de partícula, la temperatura que pueden alcanzar los materiales (fundamental a la hora de seguir el proceso de compostaje) y la humedad. Si nos centramos en otras características físicas, físico-químicas y químicas hay que fijarse en la porosidad, el pH, la cantidad de nutrientes que posee el residuo y la relación C/N.

El tamaño de partícula es limitante a la hora de determinar el tiempo que debe estar compostando el material. Un tamaño pequeño, aumenta la actividad de los

microorganismos y por tanto la velocidad de descomposición. Sin embargo, si las partículas son demasiado pequeñas y compactas, hay una menor aireación, lo que supone menor cantidad de oxígeno disponible para que los microorganismos realicen su actividad (Haug, 1993)

El tamaño óptimo de partículas, difiere, sin grandes variaciones, en función del autor consultado. Haug (1993) considera 1-5cm, Kiehl (1985) oscila en un rango menor de 2-5cm o Tchobanogolus et al (1994) lo limita a 2,5-2,7cm.

La importancia del factor humedad fue demostrada por Shulze (1962), que estudió la variación de oxígeno consumido a temperatura constante en función de la humedad. Es necesaria para que los microorganismos que llevan a cabo el proceso de compostaje sobrevivan. Se considera óptima una humedad del 50-60% (Docampo, 2013).

El principal parámetro químico a tener en cuenta es la relación C/N. Durante el proceso de compostaje los microorganismos utilizan gran parte del carbono disponible para transformar los residuos en compost, influyendo estas cantidades en la velocidad del proceso y la pérdida de amonio. La relación inicial fluctúa muy poco en función del autor consultado. Esta relación C/N debe ser aproximadamente un 30/1, disminuyendo durante el proceso hasta un 10/1 ó 15/1. Esta relación inicial se debe a que los microorganismos utilizan normalmente 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno (Jhorar et al, 1991).

Si la relación C/N es elevada (mayor de 40), la actividad disminuye porque los microorganismos deben oxidar el exceso de oxígeno para poder continuar con el proceso. Si la relación C/N es baja (menor de 15), el proceso se realizará más rápido pero el exceso de nitrógeno se convertirá en amonio (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008).

Para la degradación del carbono por parte de los microorganismos, es necesaria la presencia de oxígeno. Por ello, es fundamental una adecuada porosidad en la mezcla de residuos que favorezca una buena aireación. Si no se dispone del oxígeno suficiente, el proceso pasará de ser aerobio a anaerobio, quedándose sin completar y perdiendo nitrógeno, liberando gases productores de malos olores al ambiente (Docampo, 2013).

Los microorganismos que llevan a cabo el proceso de compostaje, aunque pueden vivir en distintos ambientes, se desarrollan mejor a pH de entre 5,5 a 8. Igualmente, la

cantidad de macroelementos (fósforo, calcio, potasio...) y micronutrientes (hierro, boro, cobre...) son determinantes para estimular la actividad microbiana (Docampo, 2013).

Para mejorar el proceso de compostaje en residuos vegetales, se inoculan microorganismos degradantes de la lignocelulosa, ya que este es el compuesto con mayor dificultad de degradar durante el proceso de compostaje (Kaur et al, 2019).

Una combinación de residuos de diferente origen para mejorar las propiedades, sumado a un pequeño volteo de la pila de compost para mejorar la aireación ayudan a reducir el tiempo de degradación y mejorar las propiedades del compost final (Kaur et al, 2019, Guang-Ting, 2004 y Hubbe et al, 210).

Por otro lado, el co-compostaje de los residuos de cultivo junto con estiércol aumenta la tasa de descomposición de los residuos vegetales, ya que este residuo ganadero actúa como fuente de carbono y reservorio de microbios (Hubbe et al, 2010).

8.1.2. Proceso de compostaje

El compostaje requiere de una fase previa de acondicionamiento del residuo. Para poder seguir el proceso de compostaje, es necesario analizar la temperatura en cada momento. Según Bueno Márquez et al. (2008), se pueden distinguir tres fases si nos centramos en este factor: fase mesófila (temperatura menor de 45°C), fase termófila (temperatura mayor de 45°C) y una última fase mesófila o de enfriamiento (llegando la temperatura a ser similar a la ambiental). En cada una de estas etapas, los microorganismos que intervienen varían.

Durante la primera fase mesófila, la temperatura inicial es la ambiental, aumentando hasta los 40°C debido a la actividad microbiana. Seguida de esta, hay una fase termófila que puede alcanzar unos 70-80°C. Aquí, la mayoría de la celulosa se degrada debido a los microorganismos termófilos. A partir de los 60°C los hongos termófilos cesan su actividad y las reacciones de oxidación son causadas por actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. La última fase se considera de enfriamiento, disminuyendo la temperatura hasta la ambiental y actuando los microorganismos mesófilos. La temperatura óptima de cada microorganismos es variable, pero se considera que debe andar entre los 45-60°C para que el proceso sea óptimo (Bohórquez Santana, 2019).

De acuerdo con el Reglamento (UE) 2019/1009 - fertilizantes UE, las temperaturas desarrolladas durante la etapa termófila pueden contribuir a la reducción de la presencia de microorganismos patógenos y de semillas de malas hierbas, higienizándose así la mezcla de residuos a compostar. Para ello, las temperaturas termófilas se deben de mantener durante los siguientes periodos de tiempo:

- 70 °C o más durante al menos 3 días
- 65 °C o más durante al menos 5 días
- 60 °C o más durante al menos 7 días
- 55 °C o más durante al menos 14 días

La humedad óptima durante el proceso oscila entre el 50-70%. Cuando la humedad es inferior, la actividad microbiana decrece y si es muy elevada, el agua ocupa los poros, reemplazando el oxígeno presente, dificultando así la aireación, y volviendo el proceso anaerobio (Bueno Márquez et al., 2008).

La aireación es variable en función del lugar de la pila donde realicemos el análisis. En la parte más externa, la cantidad de oxígeno es similar a la del aire (18-20%), en el interior este va disminuyendo y aumenta el dióxido de carbono hasta que, a una profundidad de 60 cm, el oxígeno llega a estar por debajo del 2% (Ekinci et al, 2004).

Se considera que un compost está maduro cuando su relación C/N es menor de 20. Idealmente, la C/N debe estar en torno a 10 (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008) y el pH entre 7-8 (Suler et al, 1977).

8.1.3. Sistemas de compostaje

Los sistemas de compostaje facilitan el control de los parámetros necesarios para realizar el proceso de compostaje y para obtener un producto final de calidad, tanto desde el punto de vista sanitario como fertilizante.

Existen diversos sistemas de compostaje. La forma más aceptada de clasificarlos es en función de su exposición: sistemas abiertos o cerrados. Los primeros suponen una menor inversión pero los segundos permiten controlar mejor los parámetros. El empleo de unos u otros dependen de numerosos factores.

Dentro de los sistemas abiertos destacan las pilas estáticas (con o sin aireación), las pilas con volteo y pilas con volteo y aireación.

Dentro de los sistemas cerrados destacan los reactores verticales (continuos o discontinuos) y los horizontales (estáticos o con rotación).

Las pilas estáticas consisten en el apilamiento del material sin moverlo durante el proceso de compostaje.

En aquellas que tienen aireación no forzada (o aireación pasiva), la ventilación se realiza con convención natural. Las pilas se colocan formando “pirámides” sucesivas, de tal forma que se favorece la ventilación natural, subiendo el aire caliente y formando un vacío aspirando el aire de los lados (Bernal et al., 2017).

En las pilas estáticas con aireación forzada, esta se realiza mediante sumideros de aire a presión o por succión de este. Este proceso aumenta la temperatura (disminuyendo la actividad microbiana y la eficacia del proceso) por ello, la aireación suele ir regulada por la temperatura de la pila (Tortosa, 2015).

Las pilas con volteo necesitan mayor espacio. Las pilas se mueven periódicamente para homogeneizar la masa. Después de cada volteo la temperatura disminuye, paulatinamente durante días hasta que el proceso de compostaje termine. Estos volteos se suelen llevar a cabo con una pala, aunque existe maquinaria específica para el proceso (Bernal et al., 2017).

Los sistemas cerrados permiten el control casi total de los parámetros del proceso de compostaje, siendo el mayor inconveniente su elevado precio. Los reactores verticales suelen tener alturas por encima de los 4m, pudiendo ser continuos o discontinuos (poseen aireación forzada a varios niveles y van volteando la pila hacia los pisos inferiores). Los reactores horizontales pueden o no poseer depósitos de diferentes formas geométricas donde se lleva a cabo el proceso (Bernal et al., 2017).

8.1.4. Té de compost

La preparación de compost a base de agua se conoce como té de compost. Su uso ha ido en aumento en los últimos años. Esta mezcla, además de abonar los suelos de cultivo, ayuda a aumentar su humedad, reduciendo la necesidad de riego.

Existe un gran potencial para extraer té de compost del compost a base de residuos de cultivo, que puede reducir la dependencia de fertilizantes y pesticidas químicos, así

como la mayor persistencia y acumulación de estos últimos que puede afectar negativamente al crecimiento de los cultivos. Estos extractos acuosos de compost pueden aumentar el crecimiento de las plantas y controlar enfermedades por patógenos, debido a los nutrientes y bioestimulantes que contienen (Martín, 2014).

Villeco et al (2020) estudiaron la eficacia del té de compost, obtenido a partir de diferentes compost elaborados con residuos de cultivo (tomate, alcachofa, escarola, brócoli, hinojo y maíz dulce), en plantas de tomate, pimiento y melón y observaron una mejora significativa de los factores relacionados con el crecimiento de estas plantas regadas con té de compost.

8.2. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia o biometanización es un proceso biológico donde las bacterias, en ausencia de oxígeno, convierten la materia orgánica en biogás y residuo digerido. Este último residuo es empleado principalmente como enmienda orgánica para el suelo. El biogás es una mezcla de gases, siendo el más abundante el metano (CH_4). Al quemarse éste, se produce CO_2 y H_2O (Severiche Sierra y Acevedo Barrios, 2018). La cantidad de cada compuesto, normalmente, es un 55-75% CH_4 , 25-45% CO_2 , 0-0,3% CO , 1-5% N_2 , 0-3% H_2 , 0,1-0,5% O_2 (Bilgen y Sankaya, 2016). El contenido energético del biogás es bastante menor al del gas natural, sirviendo este para producir energía eléctrica en equipos de cogeneración (calor y electricidad) o combustible para vehículos. La forma más sencilla de utilizar el biogás, es quemarlo en calderas obteniendo agua caliente o vapor (Bilgen y Sankaya, 2016).

Las principales ventajas del uso del metano producido mediante digestión anaerobia de residuos son, según Bilgen y Sarikaya (2016):

- Utilización de recursos renovables para producir energía.
- No produce Gases de Efecto Invernadero (GEI).
- La producción de un país, no depende de otro extranjero.
- Resulta una solución a la gestión de residuos.
- Reduce la contaminación producida por los residuos (utilizados en este proceso como materia prima).

El proceso de digestión anaerobia se puede dividir en cuatro etapas principales, caracterizándose cada una por los microorganismos presentes y parámetros físico-químicos que van a actuar: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Arhoun, 2017).

- Etapa de hidrólisis: las macromoléculas (insolubles la mayoría) son hidrolizadas en otras más simples (azúcares simples, ácidos grasos o aminoácidos). La velocidad de la reacción depende del pH, temperatura, composición y tamaño de partícula.
- Etapa de acidogénesis: las bacterias fermentativas actúan sobre los productos de la hidrólisis dando ácidos grasos volátiles, formiato, lactato, ácidos dicarboxílicos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. Estos productos serán usados como sustrato por las bacterias de la siguiente fase.
- Etapa acetogénica: las bacterias acetogénicas oxidan los sustratos no fermentables (reducen la acidez) produciendo acetato e hidrógeno. Si hay mucho H_2 , la actividad de estas bacterias es inhibida.
- Etapa metanogénica: en esta etapa, las bacterias metanogénicas llevan a cabo varias transformaciones. Mediante una descarboxilación de las moléculas, el acetato se convierte en CO_2 y metano. Este CO_2 se reduce para obtener H_2O y metano. Las bacterias de este grupo, son muy sensibles a cambios de alcalinidad, pH y temperatura.

Estas fases se pueden observar en la Figura 9.

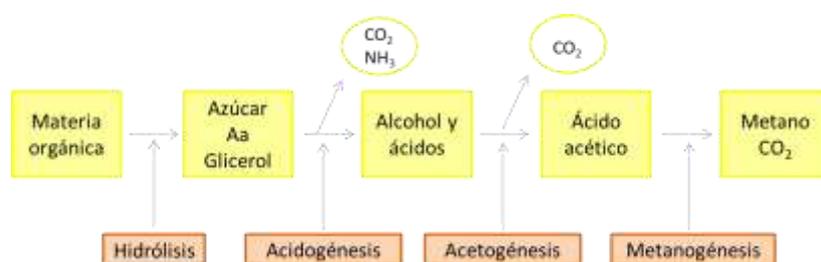


Figura 9: Digestión anaerobia. FUENTE: elaboración propia

Si el sustrato es difícil de degradar, la etapa limitante es la hidrólisis. Sin embargo, si los residuos tienen escasa celulosa, será la etapa metanogénica. En el caso de los residuos de cultivos, la mayoría son sustratos difíciles de degradar por su contenido en lignina y por lo tanto, necesitan de procesos de pretratamientos más eficientes y largos antes de la etapa de hidrólisis. Varias son las técnicas para estos pretratamientos, químicas, físicas,

térmicas y biológicas, los cuales tiene como objetivo eliminar la lignina o deconstruir la estructura lignocelulósica (Veluchamia y Kalamhadhad, 2017; Sukhesh y Rao, 2018). Otra manera de favorecer la digestión de los residuos de cultivos, cuya relación C/N es elevada, es mediante su codigestión con otros residuos. Al tratarse de residuos y no de materias producidas para ser sometidas a una digestión anaerobia, sus características no son ideales, además de ser heterogéneas según su origen. La codigestión de estos residuos vegetales con estiércol o residuos de alimentos y la adición de amoníaco pueden liberar nitrógeno durante el proceso, lo que lleva a un aumento en la producción de biogás. Vats et al. (2019) reportaron alrededor de un 22 % más de producción de biogás cuando el bagazo de caña de azúcar y los desechos de alimentos se digirieron juntos, en comparación con una sola materia prima.

Para que la digestión anaerobia tenga éxito, hay que tener en cuenta algunos parámetros como la temperatura, pH, alcalinidad, contenido de sólidos y tiempo de retención.

Un incremento de temperatura aumenta la eficiencia del proceso. Si bien, el proceso será más exitoso si esta se mantiene estable (a unos 35°C). Se pueden distinguir dos grandes intervalos: mesófilo (35°C) y termófilo (55°C). En la hidrólisis, si la temperatura es termófila, se da una mayor velocidad metabólica. Li et al (2011) obtuvo, en la digestión de rastrojos de maíz, casi un tercio más de biogás bajo condiciones termófilas que mesófilas.

La variación de pH durante el proceso, indica posibles problemas en la reacción, el rango ideal se encuentra entre los 6,8 y 7,2 (Liu et al, 2008).

La alcalinidad va a equilibrar la velocidad entre la fermentación y el consumo de ácidos grasos volátiles. Para que esto suceda, la alcalinidad debe estar entre 1500 y 3000 mgL⁻¹ (Gerardi, 2003).

En cuanto al contenido en sólidos que deben tener los residuos utilizados como productores de biogás, oscila en torno al 15-20%. Suksong et al. (2017) observaron un mayor rendimiento de metano con un contenido de sólidos del 16 % en los residuos de palma de aceite, en comparación con un contenido de sólidos del 25-35 %. Xu et al. (2014) encontraron un aumento en la producción de metano a partir de la digestión de rastrojos de maíz hasta un 20% de contenido de sólidos, mientras que un mayor aumento en el contenido de sólidos redujo el rendimiento de metano.

El tiempo de retención hidráulico (TRH) se debe tener en cuenta a la hora de diseñar el volumen del digestor, que dependerá del tipo de residuo. El TRH indica el tiempo que un residuo debe permanecer en el digestor para que toda la materia orgánica biodegradable se transforme en biogás (Arhoun, 2017).

8.3. Obtención de biocombustible

Se entiende por biocombustible cualquier tipo de combustible proveniente de biomasa. Esta energía proviene del material vegetal. Los más populares son el biodiesel y bioetanol (Hernández y Hernández, 2008).

La principal ventaja del uso de biocombustibles radica en la utilización de una fuente de energía renovable, además del uso de un residuo, evitando los problemas que estos producen. Estos biocombustibles, mediante tratamientos adecuados, pueden llegar a rebajar las emisiones hasta en un 50% comparados con combustibles fósiles. Otras de las ventajas de este tipo de energía es que no es tóxico, es biodegradable, no inflamable, viable y económico (Solano et al, 2008).

La obtención de biodiesel radica en la reacción con etanol o metanol de los triglicéridos para producir ésteres. Mediante esta transformación, las moléculas de gran tamaño, viscosas y carbonatadas, se degradan dando otras más pequeñas, lineales y con características similares al gasóleo de automoción (Canales et al., 2009).

A nivel mundial, hay más de 350 cultivos oleaginosos que se pueden emplear como materias primas para biodiésel y estas materias primas se pueden dividir en cuatro generaciones (Mahmud et al., 2022):

- La materia prima de primera generación (1G), también conocida como fuentes de aceite comestible, incluye aceite de palma, aceite de girasol, aceite de coco, soja, colza, salvado de arroz, nuez, etc.
- Las fuentes de segunda generación (2G) consisten en aceites vegetales no comestibles como *Jatropha*, *jojoba*, *karanja*, *neem*, *caucho*, etc.
- Entre las materias primas para producir biodiesel de tercera (3G) se encuentran las microalgas, el aceite de cocina usado y las grasas animales, que incluyen sebo, grasa de aves y pescado.

Por lo tanto, se puede observar que el biodiesel se genera a partir de cultivos destinados para tal fin o a partir de residuos con un alto contenido de aceite, siendo esta propiedad no muy común en los residuos vegetales de los principales cultivos, comentados en apartados anteriores.

Para obtener bioetanol, los azúcares presentes en los residuos deben sufrir un proceso de fermentación hasta que el grado alcohólico sea de 10-15%.

El proceso de obtención de bioetanol, utilizando residuos agrarios como materia prima, se puede dividir en cuatro etapas: pretratamiento (mecánico, térmico, fisicoquímico, químico o biológico), hidrólisis, detoxificación (biológica o fisicoquímica) y fermentación para obtener el bioetanol a partir de los carbohidratos de las materias primas (Vargas Corredor y Pérez Pérez, 2018).

Se entiende por bioetanol de primera generación aquel procedente de cultivos como caña de azúcar, maíz, cebada, trigo, centeno, sorgo o patata. Hablamos de bioetanol de segunda generación el obtenido a partir de materias primas no alimentarias. La obtención de este bioetanol se divide en tres etapas: pretratamiento de la lignocelulosa, hidrólisis y conversión biológica de la glucosa en etanol. Estas materias primas pueden ser residuos sólidos agroindustriales de baja pentosa (Montiel, 2010) y residuos vegetales lignocelulósicos. En la figura 10 se esquematiza el proceso de obtención de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica.

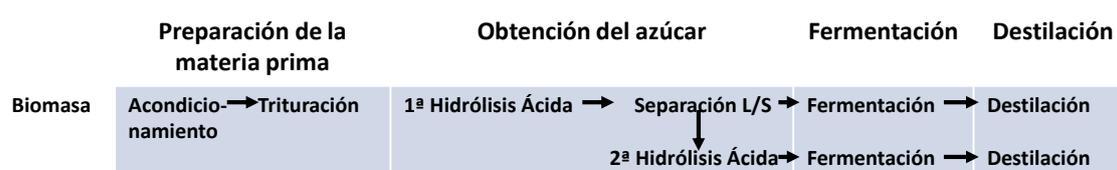


Figura 10: Esquema del proceso de obtención de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica.

FUENTE: Alvarez Gallego et al. (2015).

La biomasa lignocelulósica consiste principalmente en lignina (15%-20%), celulosa (40%-50%) y hemicelulosa (25%-35%), macromoléculas que pueden ser hidrolizadas para conseguir una disolución azucarada cuya fermentación producirá el bioetanol (Mahmud et al., 2022). En la actualidad se están llevando a cabo estudios para la deslignificación de materiales procedentes de podas de olivo y de vid para la obtención de carbohidratos, obteniéndose buenos rendimientos en la obtención de bioetanol en los procesos de fermentación (Mamaní et al., 2021; Jesus et al., 2022).

En España hay 6 plantas de biodiesel Bionol Transformación con una producción anual de 20.000 toneladas, Stocks del Valles con 6.000 t/año, Bionet Europa en Reus con 50.000 t, Biodiesel Caparrosó en Navarra con 35.000 t, Biocarburants de Catalunya 100.000 t y una en Alcalá de Henares con 5000t. También hay dos plantas de producción de bioetanol: Ecocarburantes Españoles (con una capacidad de producción de 80.000 t/año) y Bioetanol Galicia (con una capacidad de producción de 100.000 t/año) (Núñez García y García Triñanes, 2006).

9. Tratamientos térmicos de los residuos de cultivos

Como evolución a la quema de los restos agrarios, actualmente se llevan a cabo procesos termoquímicos para la obtención de bioenergía, entre los que se encuentran la combustión, pirólisis y gasificación.

Antes de llevar a cabo estos procesos, conviene analizar la composición elemental de los residuos, el cálculo de los flujos de aire y gases, la entalpía y el impacto ambiental.

La composición elemental de los residuos de cultivo es prácticamente la misma, variando su cantidad respecto a los elementos: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Por ello, según Curto-Risso et al (2017), la composición en la mayoría de los residuos de cultivos está constituida por el carbono entre un 30-60%, el hidrógeno de 5 a 7%, el oxígeno de un 30 a 45% y el nitrógeno y azufre menos de un 1%. Tanto el carbono como el hidrógeno iniciales se van a oxidar durante los procesos termoquímicos dando CO₂ y H₂O.

El poder calorífico se define como cantidad de energía liberada en forma de calor durante la combustión completa de la unidad de combustible cuando la temperatura de los productos es igual a la de los reactivos. A efectos de cálculo matemático, ésta es igual a la entalpía de reacción del combustible.

Para poder calcular empíricamente este poder calorífico superior (PCS) distintos autores han intentado desarrollar fórmulas matemáticas, destacando (todas medidas en base seca):

- Ecuación de Dulong-Berthelo, adaptada por Channiwala y Parikh:
$$\text{PCS} = 349,1C + 1178,3H + 100,5S - 103,4O - 15,1N - 21,1 \text{ Ash (kJ/kg)}.$$

- Ecuaciones de Jenkins:

$$PCS = 2338,1 + 351C \text{ (kJ/kg)} \text{ y } PCS = 20180 - 203 \text{ Ash (kJ/kg)}$$

- Ecuación de Parikh et al.:

$$PCS = 353,6 CF + 155,9 V - 7,8 \text{ Ash (KJ/Kg)}$$

CF: masa carbono fijo

V: masa volátil

9.1. Combustión o incineración para obtener energía

La combustión consiste en la oxidación de los restos agrícolas por el oxígeno existente en el aire para obtener energía. Es un proceso exotérmico que es autosuficiente.



El índice de combustibilidad (IC), evidencia el potencial aprovechamiento como combustible del residuo. Se obtiene calculando el cociente entre la masa volátil porcentual (MV%) y la masa de carbono fijo en porcentaje (CF%): $IC = MV/CF$. Cuanto mayor salga el IC, mejor será la combustión del material (Rojas González y Flórez Montes, 2019).

Para el proceso de combustión, la cantidad de nitrógeno y azufre va a determinar las emisiones de NO_x y SO_x, gases de efecto invernadero (GEI).

Tras este proceso obtendremos energía, generada a partir del calor obtenido de la reacción de combustión de los residuos agrícolas, y cenizas que son la parte inorgánica del combustible (Figura 11).

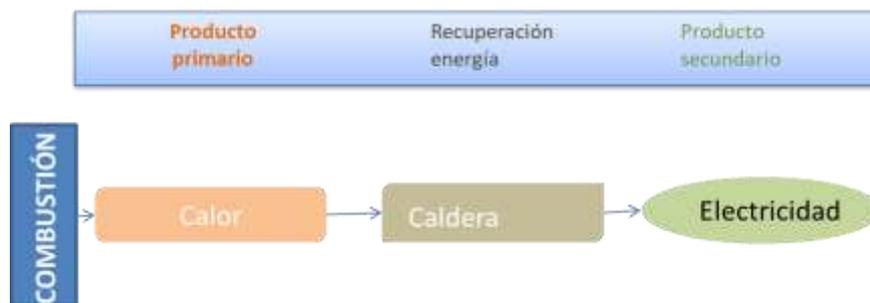


Figura 11: proceso de combustión y sus productos.
FUENTE: elaboración propia (datos obtenidos de Bridgwater, 1994).

Debido a la heterogeneidad de los materiales utilizados como base en la generación de energía (pues se trata de residuos de agricultura y no materiales cuya finalidad inicial era esto), suelen requerir de tratamientos previos de acondicionamiento.

Se han encontrado diferentes estudios sobre la valorización energética de residuos de cultivo mediante su combustión, tales como el de Rojas González y Flórez Montes (2019), que estudiaron la idoneidad de los residuos de distintos frutales para ser sometidos a un proceso de combustión. Estos autores concluyeron que, debido a su poder calorífico, su uso como fuente de energía para la combustión es una buena solución al problema ambiental y su aprovechamiento como generador de energía. Curto et al (2017) estudiaron el potencial energético de residuos agrarios no tradicionales y encontraron que existen dos principales: el ciclo de Rankine y el ciclo de Brayton. Pena-Vergara et al. (2018) van más allá y, tras el análisis de ambos ciclos, concluyeron que el primero tiene un rendimiento mayor (entorno al 25%).

El ciclo de Rankine se caracteriza por necesitar una fuente de energía externa que se pasa al flujo de trabajo. La utilización de biomasa residual frente a combustibles tradicionales con este método radica en el menor coste inicial. Por otro lado, el ciclo de Brayton se divide en dos procesos isentrópicos (compresión y expansión) y dos isócoros (calentamiento y enfriamiento). El uso de biomasa frente a combustibles tradicionales presenta ventajas en cuanto a coste, funcionamiento o potencia necesaria, sin embargo, tiene la limitación de necesitar una biomasa limpia.

Otra característica a tener en cuenta en cuanto a la calidad del combustible es su poder calorífico. El residuo más estudiado, debido también a que es el más abundante, es la paja de trigo. Aunque difieren, los autores consultados establecen que el poder calorífico de la paja de trigo seca varía entre un 15,8 a 18 MJ/kg (Martinov, 1980; Peronović et al., 1985; Radovanović, 1994).

Otros residuos muy utilizados en combustión para la obtención de energía son la paja de colza con un poder calorífico de 17,4MJ/kg; la mazorca de maíz con 14,7KJ/kg y la cáscara de girasol con 15,6 a 16,7KJ/kg (Brkic y Janie, 2000).

Viglasky (1995) en su estudio “*Biomass as energy source*” analiza otros factores que pueden tener influencia a la hora de estimar el poder calorífico, concluyendo que el tipo de biomasa, la fertilización y la ubicación no influyen en este factor.

Sin embargo, a la hora de utilizar estos residuos, siempre poseen algo de humedad y su poder calorífico disminuye al aumentar ésta. Por ello, Martinov (1980) estableció unos valores de poder calorífico neto para el contenido de humedad en equilibrio (humedad del 15%). Estos datos, los podemos observar en la tabla 13.

Tabla 13: poder calorífico con una humedad del 15% para distintos residuos.
FUENTE: Martinov (1980)

TIPO DE BIOMASA	PODER CALORÍFICO NETO (MJ/KG)
Paja de trigo	14,00
Paja de cebada	14,20
Paja de avena	14,50
Paja de centeno	14,00
Paja de maíz	13,50
Mazorca de maíz	14,70
Tallo de girasol	14,50
Cascara de girasol	17,55
Paja de soja	15,70
Paja de colza	17,40
Poda de fruticultura	14,15
Poda de viticultura	14,00

9.2. Gasificación

La gasificación consiste en transformar combustibles sólidos (biomasa seca) en gas combustible, mediante procesos térmicos donde se produce una oxidación parcial del

combustible a temperatura elevada. En este proceso se emplean cantidades de oxígeno inferiores a las requeridas estequiométricamente para la oxidación completa. El gas producido será posteriormente utilizado en motores de combustión interna, turbinas o equipos de producción de calor y potencia (Estrada y Zapata Meneses, 2004).

El gas obtenido de este proceso está libre de alquitrán y se utiliza para producir energía eléctrica con un rendimiento del 25% (motor de gas de 5MW) o gas de síntesis. Las cenizas se pueden aprovechar como material de construcción, como fertilizante, para la fabricación de vidrio, etc. (Elías Castells y Velo García, 2012).

El proceso de gasificación se puede dividir en 4 etapas (Estrada y Zapata Meneses, 2004):

- Secado: el agua que contiene la biomasa se somete a un proceso de evaporación.
- Pirólisis: descomposición de la biomasa mediante descomposición térmica anaerobia.
- Oxidación: introducción de aire en el proceso en un rango térmico de 700-2000°C.
- Reducción: reducción de la materia orgánica a altas temperaturas.

En la Figura 12 se esquematiza el proceso de gasificación y los productos que se obtienen.

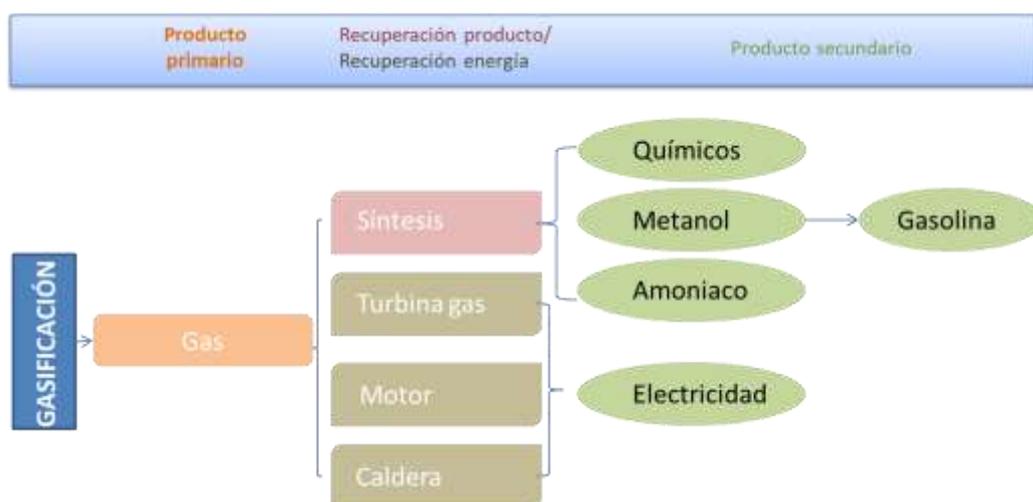


Figura 12: proceso de gasificación y sus productos.
FUENTE: elaboración propia (datos obtenidos de Bridgwater, 1994).

En general, los gases obtenidos por la gasificación de biomasa, tienen un poder calorífico bajo (4.5 y 5 MJ/m³). Sin embargo, la principal ventaja de este proceso es la disponibilidad total de materia prima mediante la eliminación de residuos evitando los problemas que estos pueden generar (Estrada y Zapata Meneses, 2004).

Mendoza et al (2012) tras su estudio “Análisis exergético de la gasificación de biomasa”, concluyeron que el factor más limitante en este proceso es la exigía física de los elementos del gas síntesis y la composición química de la biomasa tiene una importancia menor (cantidad de carbono, oxígeno y nitrógeno). Este dato, es de vital importancia al tratarse en nuestro caso de residuos agrarios que no han sido obtenidos con el fin de ser sometidos a procesos de gasificación y son de composición heterogénea.

Varios son los autores que en sus estudios han concluido que, aunque la utilización de residuos agrícolas como materia prima no es la idónea para obtener un alto rendimiento en producción de gas síntesis tras someter a éstos a la gasificación, sus ventajas tienen un mayor peso. Estas ventajas son: utilización como materia prima una fuente de energía renovable, eliminación de residuos, no sustitución de cultivos de consumo humano para la obtención de biomasa usada en estos procesos como materia prima (Mendoza et al., 2012; Estrada y Zapata Meneses, 2004).

9.3. Pirólisis

La pirólisis es un tratamiento termodinámico que consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. Siempre es una primera etapa de los procesos de gasificación y combustión. En la figura 13 se muestra un esquema del proceso de pirólisis.

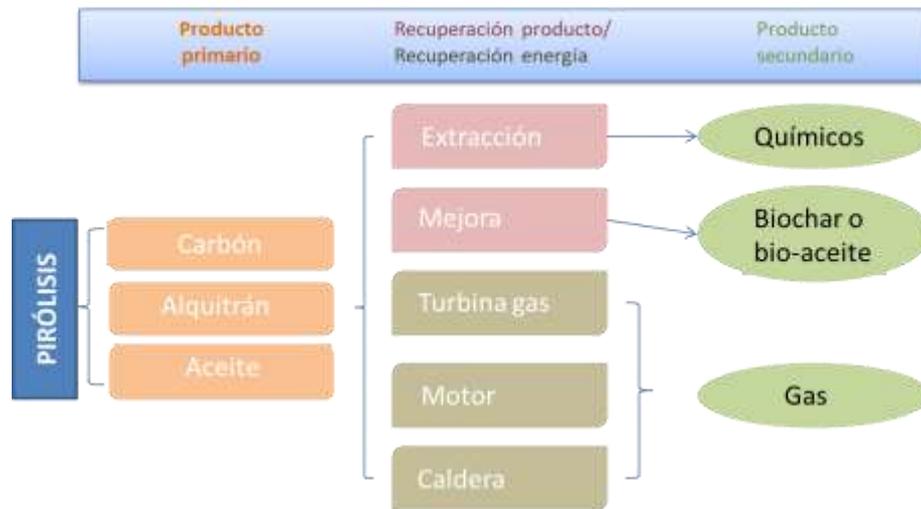


Figura 13: proceso de pirólisis y sus productos.
FUENTE: elaboración propia (datos obtenidos de Bridgwater, 1994).

La pirólisis se puede dividir en tres etapas: dosificación y alimentación de la materia prima, transformación de la materia orgánica y obtención y clasificación de los productos (sólido, líquido y gas) (Klung, 2012).

Una variación concreta de la pirólisis se conoce como torrefacción seca o pirólisis suave. Este proceso consiste en la producción de carbón a una velocidad baja de calentamiento. Se utiliza una temperatura de 200-300°C, un tiempo de residencia menor a media hora y una velocidad de calentamiento menor de 50°C/min (Vilca et al, 2022).

Otros tipos de pirólisis en función de las características a las que se lleve a cabo el proceso son (Glogot Angeles et al, 2021):

- Pirólisis lenta: temperatura de 300-550°C y un tiempo de resistencia de horas o incluso días. La velocidad de calentamiento es de 1-1,8°C/s
- Pirólisis rápida: temperatura de 452-600°C y un tiempo de resistencia menor a dos segundos. La velocidad de calentamiento es de 10-1000°C/s.
- Pirólisis flash: temperatura de 750-1000°C y un tiempo de resistencia de medio segundo. La velocidad de calentamiento es menor a 1°C.

El diagrama de Van Krevelen, que enfrenta la relación atómica del hidrogeno/carbono frente a la relación atómica del oxígeno carbono (H/C vs O/C), establece una relación inversamente proporcional entre ambos parámetros. Se utiliza para predecir si el combustible obtenido será sólido, líquido o gaseoso.

Urien Pinedo (2013) analizó el efecto de la temperatura en la obtención de los productos líquidos, sólidos o gaseosos durante el proceso de pirólisis y obtuvo que, al aumentar la temperatura en el proceso, se observa un mayor rendimiento en la obtención de gases, mientras que, se reduce el rendimiento en la de aceites y biocarbón. Estos datos se muestran en la tabla 14.

Tabla 14: Balance de masas (expresado en % p/p) de las fracciones obtenidas del proceso de pirólisis en función de la temperatura. **FUENTE:** Urien Pinedo (2013).

Producto obtenido	Temperatura (°C)		
	400	500	600
Aceite	52,8 %	49,1%	45,5%
Biocarbón	26,4%	24,4%	23,6%
Gases	20,8%	26,5%	30,9%

Por otro lado, la pirólisis puede solucionar los problemas que generan los residuos plásticos en agricultura. Amar Gil et al. (2019) estudiaron, mediante una simulación con software comercial, la pirolización de distintos tipos de plásticos, pudiendo pasar estos de residuos a productos con alto valor económico y características similares a los combustibles tradicionales.

En función del tipo de pirólisis que deseamos llevar a cabo, existen diferentes reactores para realizarla, siendo los principales los siguientes (Campuzano et al., 2019; Grosot Angeles et al., 2021):

- Lecho fijo: compuesto por un compartimiento de enfriamiento de gases y una limpieza por filtración.
- Lecho fluidizado burbujeante: la velocidad es baja para que no haya recirculación del sólido.
- Lecho fijo circulante: la velocidad es elevada para poder tener una recirculación del sólido.
- Cono giratorio: necesita una mezcla de biomasa y arena caliente.
- Barrena: usa un tornillo para transportar una sola materia prima o una mezcla con portadores de calor sólidos a lo largo de un tubo.

La pirólisis presenta dos ventajas principalmente, tiene pocos efectos adversos en el medio ambiente y como productos se obtienen altos porcentajes de valorización: 10-20% en estado gaseoso, 15-20% sólido y 60-75% líquido (Chocarro de la Fuente, 2014).

En la Tabla 15, podemos observar, según el tipo de reactor y las características, la producción de bioaceite, biochar y gas mediante la aplicación de tratamientos térmicos a distintos residuos agrarios.

Tabla 15: Producción de distintos productos mediante la pirolisis a partir de distintos residuos y tipos de reactores.FUENTE: Carpenter et al (2014)

Referencia	Tipo de reactor	T (°C)	Tipo de residuo	Producción bioaceite (% peso)	Producción biochar (% peso)	Producción gas (% peso)
Agblevor et al. (1995)	FBR	500	Rastrojo de maíz	52,7	15,9	15,1
Piskorz et al. (1998)	FBR	510	Bagazo de sorgo	58,8	13,4	11,7
Piskorz et al. (1998)	FBR	515	Paja de trigo	51,0	17,6	15,9
Hassan et al. (2009)	Barrena	450	Álamo de Virginia	52,7	16,0	31,3
Hassan et al. (2009)	Barrena	450	Algodón entero	44,1	24,3	31,6
Hassan et al. (2009)	Barrena	450	Corteza de algodón	43,7	26,1	30,2
Hassan et al. (2009)	Barrena	450	Hojas de algodón	40,3	25,6	34,1
Azeez et al. (2010)	FBR	470	Mazorca de maíz	56,2	14,7	27,2
Oasmaa et al. (2010)	FBR	480-520	Paja de colza	44,7	-	-
Oasmaa et al. (2010)	FBR	480-520	Paja de cebada	36,0	-	-

FBR: reactor de lecho fluidizado

10. Obtención de compuestos de alto valor añadido a partir de residuos de cultivos

El principal sector de estudio para la obtención de compuestos de alto valor añadido a partir de residuos de cultivo es el vitícola.

Ruales-Salcedo et al (2017) estudiaron la idoneidad de los escobajos y semillas procedentes de residuos vitícolas para obtener compuestos antioxidantes como cremas o alimentos. Concluyeron que, aunque su uso presenta beneficios frente a otros compuestos, debe investigarse y conseguir elaborar un proceso productivo más viable económicamente hablando. Los azúcares presentes en las lías y orujos pueden utilizarse para la obtención de plásticos biodegradables, existiendo ya plantas piloto con este fin como el Proyecto HaproWine (Gómez González, 2012). Otra rama de estudio es a partir de la lignocelulosa presente en los subproductos vitícolas, de los cuales se extraen fibras de celulosa para la fabricación de plásticos, reforzando así sus propiedades mecánicas (Gómez González, 2012).

La obtención de compuestos de alto valor añadido de residuos procedentes de diferentes cultivos de frutales ha sido también ampliamente estudiada por distintos autores. Cardoso Pérez y Reyes Bautista (2021) analizaron la torta residual en la producción de aceites de semillas de pitahaya concluyendo que existe una gran cantidad de aminoácidos que pueden ser aprovechados para otros fines. Vargas-Arispuro et al (1998) sin embargo, se centraron en los restos del aceite esencial de naranja, obteniendo como resultado compuestos con actividad antioxidante.

Otros residuos del sector agrario de los que se ha analizado su uso para la obtención de compuestos de alto valor añadido son los siguientes:

- Obtención de compuestos bioactivos de interés en la industria alimentaria o farmacéutica a partir de cáscaras de frutas (Vargas y Vargas et al, 2019).
- Extracción de dihidrochalconas, que se encuentran en las hojas y el fruto del manzano para obtener formulados para el tratamiento de la diabetes (Choi, 2016).
- Obtención de exopolisacáridos microbianos, con uso en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, utilizando como fuente de carbono los residuos de cultivo, tales como, cáscara de coco y cáscaras de cacao (producción de xantano)

(da Silva et al., 2018) y cascarilla de arroz (producción de pululano) (Wang et al., 2014).

- Obtención de bioplásticos a partir de ácido láctico producido durante la fermentación bacteriana de los carbohidratos contenidos en residuos de cultivo tales como, rastrojo de maíz y paja y salvado de trigo (Castro-Aguirre et al., 2016).
- Tratamiento de aguas contaminadas mediante absorbentes prospectivos obtenidos a partir de residuos de cultivos, tales como, la cáscara de coco y la paja de la caña de azúcar (Cabrera Rodríguez et al., 2016).
- Fibra de cemento obtenida mediante residuos de cascara de arroz (Camus Loredó et al., 2014).
- Compuestos antioxidantes y fenoles de los residuos del café (Sagredo Acitores, 2020).

11. Conclusiones

Después de realizar una revisión y análisis bibliográfico sobre la documentación existente en cuanto a gestión de residuos agrícolas concluimos:

- Aunque existen discrepancias, en general, la mayoría de autores concluyen que es necesaria una gestión de residuos adecuada a las características de cada material.
- Existen distintos tratamientos térmicos para realizar una gestión adecuada de residuos que, aunque no son el material idóneo, si es una solución para los residuos pudiendo convertir estos en subproductos.
- En cuanto a los tratamientos biológicos, existen algunos como el compostaje que se presenta como la opción más económica y viable para realizar en la misma explotación. Otros como la digestión anaerobia o la obtención de biocombustibles presentan mayor dificultad técnica pero también se obtienen productos con mayor utilidad.
- La obtención de compuestos de alto valor añadido a partir de residuos, actualmente, es un área de estudio en alza que necesita seguir siendo investigada para obtener resultados comerciales.

12. Bibliografía

- Agblevor, F., Besler, S., Wiselogle, A. (1995) *Energy Fuels*, 9: 635-640.
- AgroCompost (2023). Calculadora Compostaje. Disponible en la web: <https://agrocompostaje.umh.es/calculadora-compostaje/> (Acceso el 15 de marzo de 2023).
- Alvarez Gallego, C., Paredes Gil, C., López Mosquera, M.E., Fernández Morales, F.J., Bustamante Muñoz, M.A., Seoane Labandeira, S., García Morales, J.L. (2015). *Residuos Agroalimentarios*. Mundi Prensa, Madrid.
- Amar Gil, S., Ardila Arias, A.N., Barrera Zapata, R., (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37 (2): 306-326
- Argas Corredor, Y. A., Pérez Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14: 59-72.
- Arhoun, B. (2017). *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga.
- Azeez, A. M., Meier, D., Odermatt J., Willner, T. (2010) *Energy Fuels*, 24: 2078-2085.
- Bernal Calderón, M.P., Gondar Bouzada, D.M. (2008). Residuos agrícolas. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R. (Eds.). *Compostaje*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, p 489-518.
- Bernal, M.P., Sommer, S.G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., Michel Jr., F.C. (2017). Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. *Adv. Agron.*, 144: 143-233
- Bilgen, S., Sarıkaya, I., (2016) Utilization of forestry and agricultural wastes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38 (23): 3484-3490.

Blázquez, M.A. (2003). Capítulo XV. Los residuos agrícolas y de origen animal. En: Los residuos urbanos y asimilables. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Bohórquez Santana, W. (2019). El proceso de compostaje. Universidad de La Salle. Ediciones Unisalle. Bogotá, Colombia.

Bridgwater, A. V. (1994). Catalysis in thermal biomass conversion. *Applied Catalysis A: General*, 116: 5-47.

Brkic, M., Janic, T. (2000). Biomass as a source of raw materials, fertilizer, fodder and energy. *Tract Power*, 5: 23-8.

Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J. y Cabrera Capitan, F. (2008). Capítulo 4: Factores que afectan al proceso de Compostaje. Universidad de Huelva. Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf> (Acceso el 15 de marzo de 2023)

Cabrera Rodríguez, E., León Fernández, V., Montano Pérez, A. C., Dopico Ramírez, D. (2016). Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento. *Centro Azúcar*, 43(4): 27-35

Campuzano, F., Brown, R.C., Martínez, J.D. (2019). Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102: 372-409.

Camus Loredó, J., Vivar Morales, L., Infantes García, M., (2014). Elaboración de placas de compuesto de fibra cemento aprovechando residuos industriales como cascarilla de arroz y lodos del proceso de fabricación de papel blanco, como material de construcción de bajo costo. *Industrial Data*, 17 (2): 91-98.

Canales, A.M., Elias, X., Herrero, M. (2009). Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. En: Elias, X. (Ed.) *Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*, Ediciones Díaz Santos, Madrid, pp 697-784.

Cardoso Pérez, M. A., Reyes Bautista, R. (2021) Valorización de residuos de semilla de pitahaya: obtención de compuestos bioactivos con valor agregado. En: Farias Martínez, R.S., Garza de Luna, J.R., Martínez Vela, V., Gonzáles Rodríguez, L.E: (Eds.) 23

Verano de la Ciencia de la Región Centro, Instituto Tecnológico Superior de Monclova, Monclova, México, pp 28-33.

Carpenter, D., Westover, T. L., Czenik, S., Jablonski, W. (2014). Biomass feedstocks for renewable fuel production: a review of the impacts of feedstock and pretreatment on the yield and product distribution of fast pyrolysis bio-oils and vapors. *Green Chemistry*, 16: 384-406.

Castro-Aguirre, E., Iñiguez-Franco, F., Samsudin, H., Fang, X., Auras, R. (2016). Poly (lactic acid)-mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 107: 333-366.

Chávez Santana I. (2020). Residuos de una agricultura bajo plástico. *The Conversation*. Disponible en: <https://theconversation.com/residuos-de-una-agricultura-bajo-plastico-142138> (Acceso el 4 de abril de 2023)

Chocarro de la Fuente, A., (2014). Producción de hidrogeno a partir de biomasa mediante pirolisis y posterior reformado con vapor. Trabajo Fin de Grado. Universidad del País Vasco.

Choi, C.I. (2016). Sodium-Glucose Cotransporter 2 (SGLT2) inhibitors from natural products: discovery of next-generation antihyperglycemic agents. *Molecules*, 21: 1136.

Comunicación de la Comisión relativo a las normas de acceso al expediente de la Comisión en los supuestos de aplicación de los artículos 81 y 82 del Tratado CE, los artículos 53, 54 y 57 del Acuerdo EEE, y el Reglamento (CE) nº 139/2004 del Consejo”. *Diario Oficial de la Unión Europea L 325/07* de 22 de diciembre de 2005.

Cuadros, S. (2008). Residuos agrícolas, forestales y lodos. EOI. Escuela de Negocios. Disponible en: <file:///C:/Users/tsi/Downloads/componente45730.pdf> (Acceso el 4 de abril de 2023)

Curto, P., Pena, G., Mantero, C., Siri, G., Tancredi, N., Amaya, A., Durante, A., Ibañez, A., Ernst, F., Braga, L. y Flores, M. (2017). Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales. Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Da Silva, J.A., Cardoso, L.G., de Jesus Assis, D., Gomes, G.V.P., Oliveira, M.B.P.P., de Souza, C.O., Druzian, J.I. (2018). Xanthan gum production by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* IBSBF 1866 and 1867 from lignocellulosic agroindustrial wastes. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 186: 750–763.

“Decisión de la comisión de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo”. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 370 de 30 de diciembre de 2014, p.44-86.

“Decisión de la Comisión, de 3 de mayo de 2000, que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos.”. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 226 de 6 de septiembre de 2000, p.3-24.

“Decisión delegada (UE) 2019/1597 de la comisión de 3 de mayo de 2019 por la que se complementa la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que concierne a una metodología común y a los requisitos mínimos de calidad para la medición uniforme de los residuos alimentarios”. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 248/77 de 27 de septiembre de 2019, p.77.

Delgado, A.E.; Aperador, W.; Bautista Ruiz, J.H. (2011). Optical properties of ldp films with different additives mixtures. *Ing. Cienc*, 7 (14): 49-70.

“Directiva (UE) 2018/852 del parlamento europeo y del consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases”. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 150/141 de 14 de junio de 2018, p.141-154.

“Directiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases - Declaración del Consejo, de la Comisión y del Parlamento Europeo”. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 47 de 18 de febrero de 2004, p. 26–32.

“Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas”. Diario Oficial de la Unión Europea L 312 de 22 de noviembre de 2008, p.3-30.

“Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975 relativa a los residuos”. Diario Oficial de la Unión Europea L 194 de 25 de julio de 1975, p. 0039 – 0041.

“Directiva 91/156/CEE del Consejo, de 18 de marzo de 1991 por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos”. Diario Oficial de la Unión Europea L 78/32 de 26 de marzo de 1991, p. 32.

“Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases”. Diario Oficial de la Unión Europea L 365 de 31 de diciembre de 1994, p. 10-23.

“Directiva de modificación (UE) 2018/851 del parlamento europeo y del consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos”. Diario Oficial de la Unión Europea L 150/109 de 14 de junio de 2018, p. 109–140.

Docampo, R. (2013). Compostaje y compost. Revista INIA, 35: 63-67.

ECOPILAS, (n. d.). Disponible en: <https://www.ecopilas.es/> (Consultado el 14 de marzo de 2023).

Ekinci, K., Keener, H. M., Elwell, D. L. (2004). Effects of aeration strategies on the composting process: Part I. Experimental studies. Transactions of the ASAE, 47(5): 1697-1708.

Elías Castells, X. y Velo García, E. (2012) La gasificación: tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz Santos, Madrid.

Esparza, I., Jiménez-Moreno, N., Bimbela, F., Ancín-Azpilicueta, C., Gandía, L.M. (2020). Fruit and vegetable waste management: Conventional and emerging approaches. Journal of Environmental Management, 265, 110510

FAOSTAT (2023). Datos. Producción. Cultivos y productos de ganadería. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> (Acceso el 11 mayo 2023).

Galera, A. (2014). Biorresiduos: gestión y alternativas de utilización. Conama2014. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711352.pdf> (Acceso el 11 abril 2023)

Gerardi, M.H., (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Gómez González, S., (2012). LIFE HAProWINE: Gestión integral de residuos y análisis del ciclo de vida del sector vitivinícola. De residuos a productos de alto valor añadido. Congreso Nacional del Medio Ambiente 2012, [CONAMA]. Disponible en: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama11/CT%202010/1896700032.pdf> (Acceso el 26 de abril de 2023).

González Fernández, P. (1995). La quema de rastrojos. *Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera*, 759: 845-846.

Grosot Angeles, W., Rivera López, R. Y., Rascón, J., Barrena Gurbillón, M, Ordinola Ramírez, C.M, Oliva, M., Montenegro Santillán, Y. (2021). Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis. *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable*, 5 (2): 26-36.

Guang-Ting, M., (2004). Ecological organic fertilizers and sustainable development of agriculture. *Chin. J. Eco Agric.*, 12(3): 191-193.

Hassan, E.M., Yu, F., Ingram, L., Steele, P. H.(2009). *Energy Sources*, Part A, 31: 1829-1839.

Haug, R. T. (1993) *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Raton. Florida.

Hernández, M., Hernández, J. (2008). Verdades y mitos de los biocombustibles. *Elementos: Ciencia y Cultura*, 15 (71): 15-18.

Hubbe, M., Nazhad, M., Sánchez, C. (2010). Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: A review. *Bioresources*, 5: 2808-2854.

Huesca, M., González-Alonso, F., Cuevas, J. M. (2009). Distribución espacial y temporal de los incendios forestales en España utilizando datos de anomalías térmicas. Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Cataluña, 23-26 de septiembre de 2009- pp: 309-312. Disponible en: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/267089960/DISTRIBUCION_ESPACIAL_Y_TEMPORAL_DE_LOS_INCENDIOS_.pdf (Acceso el 10 de abril del 2023)

Iglesia. A., Cascudo, A., Díaz Vizcaíno, E. (2000). Comparación de la dinámica de la vegetación tras fuego controlado e incendio forestal en matorrales del interior de Galicia. Cuadernos de la S.E.C.F., 9:115-122.

Jesus, M., Romaní, A., Mata, F., Domingues, L. (2022). Current Options in the Valorisation of Vine Pruning, Residue for the Production of Biofuels, Biopolymers, Antioxidants, and Bio-Composites following the Concept of Biorefinery: A Review. *Polymers*, 14: 1640

Jhorar, B. S., Phogat, V., Malik, E. (1991). Kinetics of composting rice Straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 5 (4): 297-306.

Jones, P., Martin, M. (2003). A review of the literature on the occurrence and survival of pathogens of animals and humans in green compost. The Waste and Resources Action Programme. The Old Academy. Banbury, UK.

Kaur, P., Singh Kocher, G., Sachdeva Taggar, M., (2019). Enhanced bio-composting of rice straw using agricultural residues: an alternate to burning. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, 8: 479-483.

Kiehl, F. J. (1985). Fertilizantes orgánicos. Editora Agronómica Ceres Ltda, São Paulo, Brasil.

Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista De Química*, 26(1-2): 37-40.

Klung, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista química PUCP*, 26 (1-2): 37-40.

“Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados”. Boletín Oficial del Estado, 29 de julio de 2011, (181), pp. 85650-85705.

“Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular”. Boletín Oficial del Estado, 09 de abril de 2022, (85), pp. 48578-48733

Li, Y., Zhu, J., Wan, C., Park, Y. (2011). Solid-state anaerobic digestion of corn stover for biogas production. *Trans. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 54 (4): 1415-1421.

Liu, C., Yuan, X., Zeng, G., Li, W., Li, J., (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 99 (4): 882-888.

López López, M.J., Boluda Hernández, R. (2008). Residuos agrícolas. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R. (Eds.). *Compostaje*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, pp 9-42.

Mahmud, S., Haider, A.S.M.R., Shahriar, Sk.T, Salehin, S., Hasan, A.S.M.M., Johansson, M.T. (2022). Bioethanol and biodiesel blended fuels-Feasibility analysis of biofuel feedstocks in Bangladesh. *Energy Reports*, 8: 1741-1756.

Mamaní, A., Maturano, Y., Mestre, V., Montoro, L., Gassa, L., Deiana, C., Sardella, F. (2021). Valorization of olive tree pruning. Application for energy storage and biofuel production. *Industrial Crops and Products*, 173: 114082.

Marín-Guirao, J.I., Samblas Punzano, E., Granados García, M.R., Tellez, M.M., Torres Nieto, J.M., de Cara, M. (2023). Gestión de Restos Vegetales de Hortícolas Protegidos mediante Picado y Enterrado. *Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Almería.*

Martin, C.C.G. (2014). Potential of compost tea for suppressing plant diseases. *CAB Rev.*, 9: 1-38.

Martinov, M. (1980). Calorific value of cereals straw grown in the area of SAP. *Cont. Agr. Engng.*, 6: 95-101.

Medio ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos”. Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones, de 24 de enero de 2001. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2001:0031:FIN:ES:PDF> (Acceso 13 marzo del 2023)

Mendoza, J. M., Bula, A. J., Gómez, R. D. y Corredor, L. A. (2012). Análisis exergético de la gasificación de biomasa. *Información Tecnológica*, 23 (5): 85-96.

Mettu, S., Halder, P., Patel, S., Kundu, S., Shah, K., Yao, S., Hathi, Z., Ong, K.L., Athukoralalage, S., Choudhury, N.R., Dutta, N.K. and Lin, C.S.K. (2020). Valorisation of Agricultural Waste Residues. En: C. Sze Ki Lin, G. Kaur, C. Li and X. Yang (Eds.) *Waste Valorisation*. John Wiley & Sons Ltd., Reino Unido. pp. 51-86.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012). Producción y consumo sostenible y residuos agrarios. Disponible en la web: https://www.miteco.gob.es/images/es/Residuos%20agrarios_tcm30-193059.pdf (Acceso el 10 de mayo de 2023).

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA] (2021). Anuario de Estadística del año 2021. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx> (Acceso el 10 de abril de 2023).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], (s.f.) Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/Planes-y-Programas.aspx> (Acceso el 15 de abril de 2023).

Montiel J. (2010). Potencial y riesgo ambiental de los bioenergéticos en México. *Ra Ximhai*, 6 (1): 57-62 .

Moreno Casco, J. y Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Ediciones Mundi Prensa, Madrid.

Núñez García, M^a. J. y García Triñanes, P. (2006). Biocombustible: bioetanol y biodiesel. Universidad de Santiago de Compostela. *Boletín das Ciencias*, 61: 179-1803

Oasmaa, A., Solantausta, Y., Arpiainen, V., Kuoppala, E. y Sipila, K. (2010) *Energy Fuels*, 24: 1380-1388.

Onwosi, C.O., Igbokwe, V.C., Odimba, J.N., Eke, I.E., Nwankwoala, M., Iroh, I.N., Ezeogu, L.I. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *J. Environ. Manag.*, 190: 140–157.

“Orden APA/1610/2003, de 17 de junio, por la que se regula la retirada de los productos fitosanitarios que contengan sustancias activas excluidas de la lista comunitaria”. *Boletín Oficial del Estado*, 19 de junio de 2003, (146), pp. 23560-23561.

“Orden APM/205/2018, de 22 de febrero, por la que se establecen los criterios para determinar cuándo el aceite usado procesado procedente del tratamiento de aceites usados para su uso como combustible deja de ser residuo con arreglo a la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados”. *Boletín Oficial del Estado*, 2 de marzo de 2018, (54), pp. 25942-25952.

Ortiz de Zarate Isasi, I. (1997). Estudio del impacto atmosférico producido por la quema de rastrojo. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.

Pena-Vergara, G., Druante, A. y Curto-Risso, P. (2018). Aprovechamiento energético de residuos agrarios en Uruguay. *ENERLAC*, Vol II (1): 42-55.

Pérez Murcia M. D., Pérez Espinosa A. (2021). Residuos orgánicos de origen agrícola y ganadero. En *Master Universitario en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos*. Universidad Miguel Hernández de Elche.

Piskorz, J., Majerski, P., Radlein D., Scott D. (1998) *Anal. Appl. Pyrolysis*, 46: 15-29.

“Real Decreto 1055/2022, de 27 de diciembre, de envases y residuos de envases”. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de diciembre de 2022, (311), pp. 185982-186068.

“Real Decreto 1416/2001, de 14 de diciembre, sobre envases de productos fitosanitarios”. *Boletín Oficial del Estado*, 28 de diciembre de 2001, (311), pp. 50002-50004.

“Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de

Envases, y por el que se modifica el Reglamento para su ejecución, aprobado por el Real Decreto 782/1998, de 30 de abril”. Boletín Oficial del Estado, 4 de marzo de 2006, (54), pp. 8961-8967.

“Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes”. Boletín Oficial del Estado, 10 de julio de 2013, (164), pp. 51119 - 51207.

“Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado”. Boletín Oficial del Estado, 19 de junio de 2020, (171), pp. 42222-42243.

“Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero”. Boletín Oficial del Estado, 8 de julio de 2018, (187), pp. 48659-48721.

“Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación”. Boletín Oficial del Estado, 19 de octubre de 2013, (187251 pp. 85173-85276.

“Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo”. Boletín Oficial del Estado, 14 de julio de 2010, (170), pp. 61831 – 61859.

“Reglamento (UE) 2016/2021 del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de octubre de 2016 relativo a las medidas de protección contra las plagas de los vegetales, con sus modificaciones posteriores, siendo la más reciente la del Reglamento Delegado (UE) 2022/2404.”. Diario Oficial de la Unión Europea L 317/4 de 23 de noviembre de 2016, p.4-104.

“Reglamento (UE) 2019/1009 del parlamento europeo y del consejo de 5 de junio de 2019 por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) nº 1069/2009 y (CE) nº 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) nº 2003/2003”. Diario Oficial de la Unión Europea L 170 de 25 de junio de 2019, p.1-114.

Rivas-Ubach, A., Lui, Y., Bianchi, T. S., Tolic, N., Jansson, C., Pasa-Tolic, L. (2018) Moving beyond the van Krevelen Diagram: A New Stoichiometric Approach for Compound Classification in Organisms. *Anal. Chem*, 90: 6152-6160.

Rojas González, A. F., Flórez Montes, C. (2019). Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis. *Revista Politécnica*, 15 (28): 42-53.

Ruales-Salcedo, A. V., Rojas-González, A. F., Cardona-Alzate, C. A., (2017). Obtención de compuestos fenólicos a partir de residuos de uva Isabela (*vitis labrusca*). *Revista Bio. Agro*, 15 (2): 72-79.

Ruiz, G.; Montoya, C.; Paniagua, M. (2009). Degradabilidad de un polímero de almidón de yuca. *Revista EIA*, 12: 67-78.

Sagredo Acitores, M. (2020). Recuperación de compuestos con propiedades antioxidantes a partir de residuos de la industria del café. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Valladolid.

Sánchez, L. P., Sepúlveda F. P, (n. d.). Caracterización y clasificación de los residuos silvoagropecuarios. Instituto de Investigaciones agropecuarias [INIA]. Ministerio de agricultura. Boletín INIA nº463. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68502/Capitulo%204.pdf?sequence=5&isAllowed=y> (Acceso el 13 de mayo de 2023).

Sanz, D. (2012). Plástico fabricado con maíz para el cultivo de la fresa. Disponible en: www.ecologiaverde.com/plastico-fabricado-con-maiz-pa-ra-el-cultivo-de-la-fresa/ (Acceso el 16 de marzo de 2023)

Severiche Sierra, C. A. y Acevedo Barrios, R. L., (2018) Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación. *Ingenium. Revista de la Facultad de Ingeniería*, 14: 6-15.

Shulze, K.L. (1962). Continuous Thermophilic Composting. *Appl. Microbiol.*, 10 (2): 108-122.

Sistema Colectivo de Gestión de Neumáticos Fuera de Uso [SIGNUS], (n. d). Disponible en: <https://www.signus.es/> (Acceso el 14 de marzo de 2023).

Sistema de recogida de envases fertilizantes y fitosanitarios [SIGFITO], (n. d.). Disponible en: <https://sigfito.es/> (Acceso el 14 de marzo de 2023).

Solano, P., Moneada, J., Cardona, C, Simón, O. (2008). Modelamiento y simulación de un biorreactor de membrana para obtención de biodiesel. *Revista Universidad EAFIT*, 44 (151): 84-92.

Solé Mauri F. Flotats, Ripoll, X. (2004). *Guía de Técnicas de Gestión Ambiental de Residuos Agrarios*. Fundació Catalana de Cooperació. Lleida.

Sukhesh, M.J., Rao, P.V. (2018). Anaerobic digestion of crop residues: technological developments and environmental impact in the Indian context. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 16 (4): 513-528.

Suler, D. J., Finstein, S. (1977). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33(2): 345-350.

Tchobanogolus, G., Theisen, H. y Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid.

Tortosa, G. (2009). *Materia orgánica en agricultura y los residuos orgánicos*. Compostando Ciencia. Disponible en: <http://www.compostandociencia.com/2009/10/fuentes-de-materia-organica-en-html/> (Acceso el 11 de marzo 2023)

Tortosa, G. (2015). *Sistemas de compostaje*. Disponible en: <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/> (Acceso el 4 de abril 2023)

Tratamiento de neumáticos usados [TNU], (n. d.). Disponible en: <https://www.tnu.es/> (Acceso el 14 de marzo de 2023).

Urien Pinedo, A., (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. Trabajo Fin de Máster. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Valverde-Orozco, V., Gavilanes-Terán, I., Idrovo Novillo, J., Carrera Beltrán, L., Buri-Tanguila, S., Salazar García, K., Paredes Gil, C. (2022). Characterization of Agro-Livestock Wastes for Composting in Rural Zones in Ecuador: The Case of the Parish of San Andrés. *Agronomy*, 12: 2538.

Vargas Arispuro, L.; Sanz, B. I.; Martínez Téllez, M. A., Primo-Yúfera, E., (1998). Actividad antioxidante de compuestos aislados del residuo no-volátil del aceite esencial de naranja. *Grasas y Aceites*, 49(2): 159-164

Vargas Corredor, Y. A., & Pérez Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 1(1), 59–72. Disponible en: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/3108>

Vargas y Vargas, M. L., Figueroa Brito, H., Tamayo Cortez, J. A., Toledo López, V. M., Moo Huchin, V. M. (2019) Aprovechamiento de cáscaras de frutas. Análisis nutricional y compuestos bioactivos. *CIENCIA ergo-sum*, vol 26, nº 2. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7069669> (Acceso el 30 de mayo 2023).

Vats, N., Khan, A.A., and Ahmad, K. (2019). Observation of biogas production by sugarcane bagasse and food waste in different composition combinations. *Energy*, 185: 1100-1105.

Veluchamy, C., Kalamdhad, A.S. (2017). Influence of pretreatment techniques on anaerobic digestion of pulp and paper mill sludge: a review. *Bioresour. Technol.*, 245: 1206-1219.

Vera y Vega. A. (1988). Las quemadas de rastrojos y el vacío ganadero en el Valle del Guadalquivir: análisis crítico y propuesta de soluciones. Disponible en: <file:///C:/Users/tsi/Downloads/Dialnet-LasQuemasDeRastrojosYElVacioGanaderoEnElValleMedio-2369493.pdf> (Acceso el 21 de marzo 2023)

Viglasky, J. (1999). Biomass as energy source. *J. Electr Eng.* , 5: 15-6.

Vilca, K., Rodríguez S., Atama, U., Cueva, C., Concha, W. J., Atausupa, M.A., Gosgot, W. (2022). Pirólisis; una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable*, 6 (1): 43-56.

Villecco, D., Pane, C., Ronga, D., Zaccardelli, M. (2020). Enhancing sustainability of tomato, pepper and melon nursery production systems by using compost tea spray applications. *Agronomy* 10, 1-16.

Wang, D., Ju, X., Zhou, D., Wei, G. (2014). Efficient production of pullulan using rice hull hydrolysate by adaptive laboratory evolution of *Aureobasidium pullulans*. *Bioresource Technology*, 164: 12-19.

Xu, F., Wang, Z.-W., Tang, L. et al. (2014). A mass diffusion-based interpretation of the effect of total solids content on solid-state anaerobic digestion of cellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 167: 178-185.