



PROMOVIENDO LA GENERACIÓN DE CALOR CON AGROBIOMASA
EN ZONAS RURALES EUROPEAS

RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del Acuerdo de subvención No 818369





UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No 818369

SOBRE ESTA PUBLICACIÓN

La publicación "Restos del cultivo de maíz para la producción de energía", realizada por la Asociación de Bioenergía de Ucrania, forma parte de una serie de guías elaboradas en el marco del proyecto AgroBioHeat que pretenden proporcionar un conocimiento sobre la utilización de diferentes tipos de recursos de agrobiomasa. En particular, se centra en los restos del cultivo del maíz y en cómo este recurso de biomasa -producido anualmente en grandes cantidades y actualmente infrutilizado- puede ser cosechado y utilizado eficazmente para la producción de bioenergía.

Por su parte, el proyecto AgroBioHeat tiene como objetivo producir un despliegue masivo de soluciones de calor renovable usando agrobiomasa en Europa. La agrobiomasa es un recurso autóctono de gran disponibilidad y poco explotado que puede contribuir a la consecución de los objetivos europeos en materia de energía y clima, al tiempo que promueve el desarrollo rural y la economía circular. El proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 818369.

Para más información sobre el proyecto, visite www.agrobioheat.eu.

Este documento refleja únicamente las opiniones de los autores. La Agencia Ejecutiva Europea de Clima, Infraestructuras y Medio Ambiente (CINEA) no es responsable del uso que pueda hacerse de la información que contiene.

AUTORES

Georgii Geletukha, Semen Drahniev, Tetiana Zheliezna/
Asociación de Bioenergía de Ucrania (UABIO)
Manolis Karampinis/
Centre for Research & Technology Hellas (CERTH)

En cooperación y traducido al castellano por
AVEBIOM y CIRCE

DESIGN & LAYOUT

Olga Nikitina
olik5981@gmail.com

ABREVIATURAS

Abreviaturas	Explanation
b.h.	Base húmeda
b.s.	Base seca
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
DA	Digestión Anaeróbica
EN	Envolturas
ESP	Precipitador electrostático
ETP	Emisiones Totales de Partículas
FPBO	Producción de bioaceite de pirólisis rápida
GEI	Gases Efecto Invernadero
GNR	Gas Natural Renovable
GR	Grano
HO	Hojas
IC	Índice de Cosecha
MA	Mazorca
MGZ	Mezcla Grano Zuro
Mgy	Millones de galones por año
MS	Materia seca
PCI	Poder Calorífico Inferior
SFS	Sacarización y Fermentación Simultáneas
SV	Sólidos volátiles
TA	Tallos
ZU	Zuro

CONTENIDO

Introducción	7
Restos del cultivo de maíz como fuente de energía....	8
Producción de maíz	8
Restos del cultivo de maíz	9
Propiedades como combustible de los restos del cultivo de maíz	15
Cosecha de los restos del cultivo de maíz	17
Tecnologías de recolección del grano de maíz	17
Opciones de cosecha de los restos de maíz	19
La cadena de suministro de restos del cultivo de maíz de DuPont	22
Transporte de pacas de cañote de maíz	23
Recogida de cañote de maíz en pacas redondas ...	24
Recolección de cañote de maíz triturado.....	24
Sistemas de recolección de zuro de maíz	25
Almacenamiento de cañote de maíz.....	25
Densificación de cañote de maíz	27
Producción de calor a partir de restos del cultivo de maíz	28
Producción de calor a partir de cañote de maíz ..	28
Producción de calor a partir del zuro de maíz ..	29
Cañote de maíz en plantas de generación eléctrica y cogeneración	31
Restos del cultivo de maíz para producción de bioetanol	33
Restos del cultivo de maíz para producción de biogás	35
Aspectos de sostenibilidad en la utilización de los restos del cultivo de maíz.....	38
Eliminación sostenible de los restos del cultivo de maíz	38
GHG emissions from maize residues logistics	39
Anexo I: Principales tipos de maquinaria para la recolección, la logística y la transformación en pellets/briquetas de los restos del cultivo de maíz	40
Anexo II: Sistemas de energía para producir calor a partir de restos del cultivo de maíz	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Principales productores de maíz a nivel mundial en los últimos 5 años (por campaña)	8
Tabla 2: Comparación de las propiedades como combustible de las distintas fracciones de los restos de campo del cultivo de maíz con respecto a diferentes tipos de biomasa	15
Tabla 3: Producción de metano a partir de restos de campo del cultivo de maíz y ensilado de maíz	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rendimiento de producción de maíz en EE. UU. desde 1866 a 2019	10
Figura 2: Rendimiento y producción de maíz en grano y de la mezcla de maíz y mazorca en los países de la UE de 2015 a 2019. (Fuente: datos online provenientes de Eurostat: TAG00093, elaboración propia)	10
Figura 3: Diferentes partes aéreas de la planta de maíz y su proporción en peso en base a peso seco	11
Figura 4: Modelo empírico para la predicción del rendimiento de restos del cultivo de maíz en función del rendimiento en grano	11
Figura 5: Restos del cultivo de maíz abandonados en campo después de la cosecha	12
Figura 6: Potencial energético de los restos de campo del cultivo de maíz en Europa (2019)	13
Figura 7: Diferentes clientes finales para diversos restos de campo del cultivo de maíz	14
Figura 8: Poder calorífico inferior (PCI) en función del contenido de humedad (base húmeda) del cañote de maíz.....	16
Figura 9: Cosechadoras de maíz en grano y los flujos de sus subproductos	17
Figure 10: Cosecha de maíz con cosechadora desgranadora con cabezal	18
Figura 11: Generación de restos de maíz durante el empleo de la cosechadora	19
Figura 12: Técnicas de recolección de restos del cultivo de maíz	20
Figura 13: Modelos de maquinaria agrícola para la recolección de restos del cultivo de maíz	21
Figura 14: Modelo de planta de etanol celulósico de DuPont para la cadena de suministro de restos de cultivo del maíz.....	22

Figura 15: Programa de funcionamiento de la planta de bioetanol celulósico de DuPont	23	Figura 22: Proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica	33
Figura 16: Cadenas de suministro de restos de maíz triturados	24	Figura 23: Diagrama esquemático del pretratamiento del material lignocelulósico para la producción de biogás	36
Figura 17: Cosechadoras de zuro.....	25	Figura 24: Dependencia de la tasa de eliminación de restos de campo del cultivo de maíz con respecto a factores económicos y agronómicos	38
Figura 18: Almacenamiento al aire libre de pacas de cañote de maíz en España	26	Figura 25: Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero por el uso alternativo de los restos de campo del cultivo de maíz en la red eléctrica estadounidense	39
Figura 19: Pacas cuadradas de cañote maíz en Krynichnoe (Ucrania)	28		
Figura 20: Planta de biomasa de 15 MW en Miajadas (España)	32		
Figure 21: Pacas de cañote de maíz en el almacén de biomasa de la central de Miajadas (España)	32		

INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes del mundo. Es una planta muy productiva de origen tropical con un metabolismo fotosintético tipo C4. Su origen está la región andina de América Central, lo que explica sus necesidades de calor para su crecimiento y desarrollo. Una de sus características es que, en poco tiempo, el maíz produce más materia orgánica que muchos otros cultivos, cultivándose para obtener tanto grano como forraje (ensilado o directamente consumido por los animales). Su producción anual mundial varió¹ entre las 972 y las 1123 Mt en el periodo de 2015-2019. En

el año de comercialización 2019/2020, la UE produjo 65 Mt de maíz, lo que supuso casi el 6% de la producción mundial¹. En Ucrania, la producción de maíz ha superado la producción de trigo, convirtiéndose en el cultivo principal en el país por toneladas de cosecha. Esto estaría relacionado con las valiosas propiedades nutricionales y organolépticas del maíz que hacen que su demanda a nivel mundial y europea sea muy elevada. Por otro lado, el rendimiento medio del maíz ha sido superior a 7 t/ha en la UE en los últimos años.

Además del grano, durante la cosecha del maíz se genera una cantidad considerable de restos (tallos, hojas, zuro, cáscara o envoltura, etc.)². Recogidos y extraídos de los campos, estos restos se consideran subproductos del cultivo del maíz. Esta agrobiomasa puede utilizarse para diferentes fines, entre ellos la bioenergía como, por ejemplo, para la producción de biocombustibles sólidos, biogás y biocombustibles líquidos de segunda generación. Ahora mismo los restos de maíz son un recurso infrutilizado, sin embargo, el hecho de ser renovable y local podría ayudar a la consecución de los objetivos europeos en materia de energía y clima, al tiempo de promover el desarrollo rural y la economía circular, de ahí su interés.



Los restos de maíz tienen propiedades especiales como combustible, lo que requiere el uso de calderas especialmente diseñadas para quemar este tipo de agrobiomasa. El uso económicamente viable de esta biomasa también depende de la adecuada cadena de suministro "cosecha - logística - almacenamiento". En

esta guía se describen estas cuestiones y el potencial energético de los restos de maíz en la UE y en Ucrania, la posibilidad de transformar esta agrobiomasa en pellets/briquetas, en biogás y en biocombustible líquido de segunda generación, además de tratar los aspectos de su sostenibilidad.

¹ Informe sobre la Producción Agrícola Mundial del USDA <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>.

² La parte aérea del maíz cultivado para grano y que se deja en el campo tras la cosecha (principalmente tallos, hojas, envolturas y zuro) suele denominarse "cañote", "restos de campo" o "paja de maíz".

RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ COMO FUENTE DE ENERGÍA

PRODUCCIÓN DE MAÍZ

El maíz es uno de los cultivos más extendidos a nivel mundial debido tanto a la posibilidad de su cultivo con altos rendimientos en diferentes lugares como a su creciente demanda por utilizarse para la producción de una amplia gama de productos, incluidos los bio-combustibles. Por ejemplo, a nivel mundial, cerca del 60% del bioetanol se produce a partir del maíz³. Y en EE. UU., en el año 2019, casi el 30% del maíz que se cosechó (105,6 Mt) se utilizó para la producción de bioetanol de primera generación⁴.

Con respecto a la producción, EE. UU. es el líder mundial tanto en producción como en rendimiento (Tabla 1). Por su parte, la UE es el cuarto productor mundial mientras que Ucrania ocupa el sexto lugar. Según los

datos de la campaña 2020/2021, la producción de maíz en EE. UU. fue de 358,5 millones de toneladas (32% de la producción mundial), con un rendimiento medio de 10,8 t/ha. En otros países, la producción de maíz fue la siguiente: China 260,7 Mt, Brasil 87 Mt, UE 67,1 Mt, Argentina 50,5 Mt, India 31,5 Mt y Ucrania 30,3 Mt. Las previsiones del USDA para la campaña 2021/2022 son de 70,4 Mt para la UE y 40,0 para Ucrania, lo que supone un ligero aumento con respecto al año anterior⁵. Cabe señalar que en la UE, el maíz forrajero o para ensilado, cosechado en verde, también ocupa una gran superficie. Así, en 2019, la superficie de maíz de ensilado cosechado fue de 6,4 millones de hectáreas⁶ lo que supone casi el 14,5% de la superficie cultivada de maíz en la UE y más del 18,5% en Ucrania *area under maize was almost 14.5% of arable lands in the EU28, and above 18.5% in Ukraine.*

TABLA 1:

Principales productores de maíz a nivel mundial en los últimos 5 años (por campaña)⁵

No.	País / región	Área, Mha					Rendimiento, t/ha					Producción, Mt				
		2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
1	EE. UU.	33.5	32.9	32.9	33.3	34.4	11.1	11.1	10.5	10.8	11.1	371.1	364.3	346.0	358.5	382.6
2	China	42.4	42.1	41.3	41.3	43.3	6.1	6.1	6.3	6.3	6.5	259.1	257.2	260.8	260.7	272.6
3	Brazil	16.6	17.5	18.5	19.9	20.8	4.9	5.8	5.5	4.4	5.7	82.0	101.0	102.0	87.0	118.0
4	EU	8.3	8.3	8.9	9.3	9.4	7.5	7.8	7.5	7.2	7.5	62.0	64.4	66.7	67.1	70.4
5	Argentina	5.2	6.1	6.3	6.4	6.8	6.2	8.4	8.1	7.9	8.0	32.0	51.0	51.0	50.5	54.5
6	Ucrania	4.4	4.6	5.0	5.4	5.4	5.4	7.8	7.2	5.6	7.4	24.1	35.8	35.9	30.3	40.0
7	India	9.4	9.0	9.6	9.9	9.7	3.1	3.1	3.0	3.2	3.1	28.8	27.7	28.8	31.5	30.0
8	Méjico	7.3	7.2	6.6	7.1	7.3	3.8	3.8	4.0	3.8	3.8	27.6	27.6	26.7	27.4	28.0
	Mundo	192.2	192.1	193.6	198.8	203.0	5.6	5.9	5.8	5.7	6.0	1080	1123	1120	1123	1209

NOTAS: CAMPAÑA 2020/2021 – DATOS PRELIMINARES; CAMPAÑA 2021/2022 – PREVISIÓN (DICIEMBRE 2021).

³ OECD FAO Agricultural Outlook 2019 2028. <http://www.fao.org/3/ca4076en/ca4076en.pdf>

⁴ World of corn 2020. <http://www.worldofcorn.com/pdf/WOC-2020.pdf>

⁵ World Agricultural Production, USDA Reports <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>

⁶ Eurostat <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>

El aumento del rendimiento del maíz durante las últimas décadas (Fig. 1) está asociado a la tecnificación de la agricultura y al uso de la biotecnología para el desarrollo de cultivos híbridos. En 2019, la Asociación Nacional de Productores de Maíz de Estados Unidos anunció el récord mundial en Virginia con cerca de 38,7 t/ha⁷. Además, se espera un crecimiento del rendimiento medio mundial del maíz (media de los años 2016-2018) del 14% hasta 2028⁴.

La distribución del rendimiento y de la producción de maíz en grano y de maíz forrajero en los países de la UE se muestra en la Fig. 2, predominando el maíz en grano. Los principales productores de maíz en 2019 fueron Rumanía (17,3 Mt), Francia (13,0 Mt) y Hungría (8,3 Mt). Por su parte, de 2015 a 2019, el mayor rendimiento medio de maíz en grano y de forrajero se alcanzó en España (11,6 t/ha), Grecia (10,3 t/ha) y Austria e Italia (10,1 t/ha).

RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

El principal producto del cultivo del maíz es el grano, que es la razón económica de la actividad de los agricultores. Pero, además, la planta de maíz consta de diferentes partes subterráneas y aéreas (Fig. 3), que forman los restos del maíz. Una determinación que suele emplearse para conocer la cantidad de subproducto generado por los cultivos es la relación (R/P) entre el rendimiento del subproducto, resto o residuo de maíz (R) y el rendimiento de producción de grano (P). Esta

relación depende de muchos factores, aunque los principales son la variedad, las prácticas agrícolas, el clima y las condiciones del campo⁹. Es importante señalar que, en el caso del maíz, la relación restos/grano (R/P) es significativamente mayor que la de otros cereales. Además, según datos experimentales, la formación de biomasa en hojas y tallos de maíz puede ser elevada incluso en condiciones de estrés hídrico moderado, lo que convierte a este cultivo en una importante fuente de biomasa por su volumen de restos generados¹⁰. En general, esta relación R/P (R/Y en inglés) se reduce con el aumento del rendimiento de maíz (Fig. 4), aunque es conveniente utilizar la relación estándar R/P para cualquier tipo de cálculo. Por ejemplo, en Ucrania, la relación típica R/P es de 1,3. Por otro lado, también se puede utilizar el índice de cosecha (IC) que consiste en relacionar el peso del grano y el peso total (biomasa total, es decir, de la planta completa), en base a materia seca. En EE. UU., el IC suele estar en torno a 0,50¹¹, lo que coincide con un R/P de 1.

En la literatura científica se proponen diferentes correlaciones para la estimación de la relación R/P basadas en el rendimiento del grano. En esta guía, se utiliza la ecuación dada por Bentsen et al.¹² para la evaluación del potencial de biomasa de los restos de maíz, ya que se considera que proporciona una buena correlación con las observaciones experimentales:

$$R/Y = 2.656 * \exp(-0.103 * Y),$$

donde R/P y P se miden como t/ha en peso seco (base seca).

⁷ <https://www.ocj.com/2019/12/2019-national-corn-yield-contest-hits-new-yield-record/>

⁸ https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/croptr18.pdf

⁹ Camia A., Robert N., Jonsson R., Pilli R., García-Condado S., López-Lozano R., van der Velde M., Ronzon T., Gurría P., M'Barek R., Tamosiunas S., Fiore G., Araujo R., Hoepffner N., Marelli L., Giuntoli J., Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment, EUR 28993 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN978-92-79-77237-5, doi:10.2760/539520, JRC109869

¹⁰ Maximising the yield of biomass from residues of agricultural crops and biomass from forestry. Final report of Ecofys project. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Ecofys%20-%20Final_%20report_%20EC_max%20yield%20bio-mass%20residues%2020151214.pdf

¹¹ https://www.canr.msu.edu/news/harvest_index_a_predictor_of_corn_stover_yield

¹² Bentsen NS, Felby C, Thorsen BJ. Agricultural residue production and potentials for energy and materials services. *Progr Energy Combustion Sci* 2014;40:59–73. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.09.003>

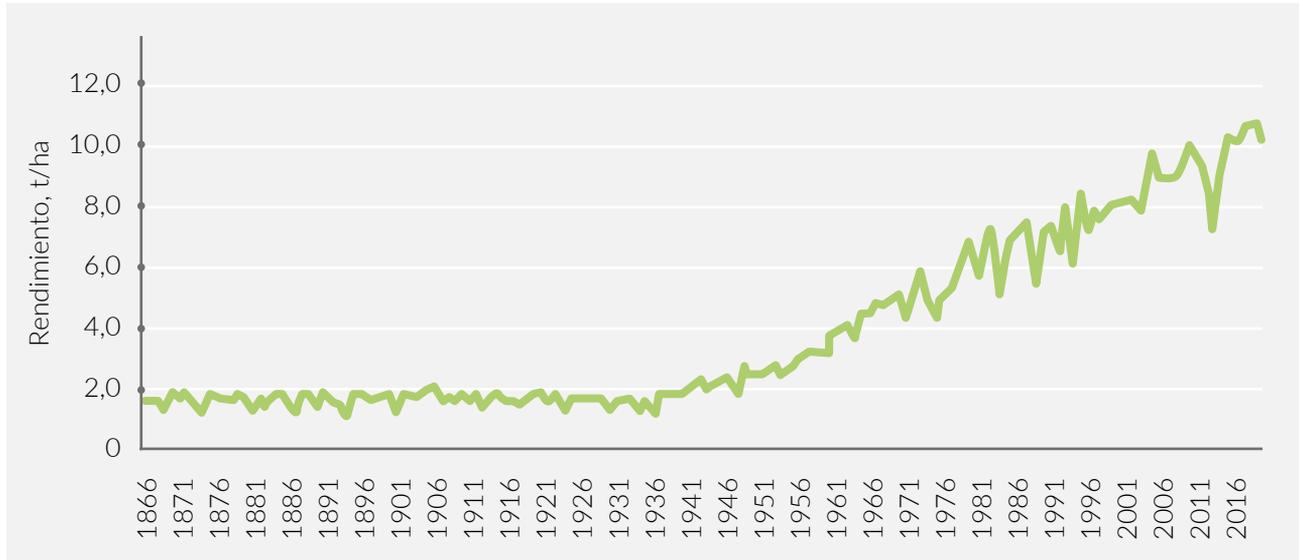


FIGURA 1: Rendimiento de producción de maíz en EE. UU. desde 1866 a 2019⁸.

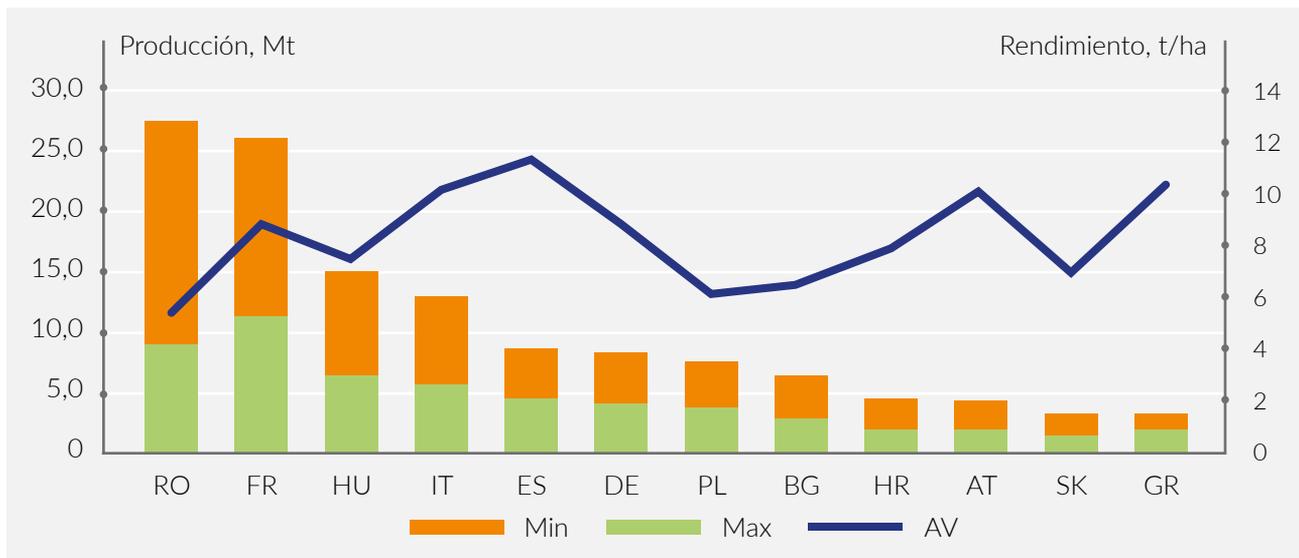


FIGURA 2: Rendimiento y producción de maíz en grano y de maíz para forraje en los países de la UE de 2015 a 2019. (Fuente: datos online provenientes de Eurostat: TAG00093, elaboración propia).

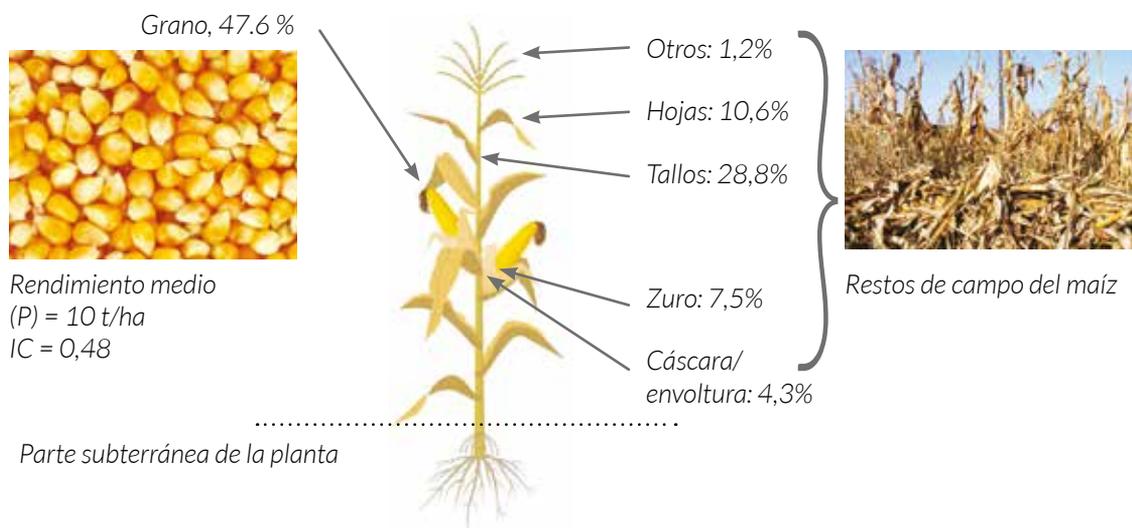


FIGURA 3:

Diferentes partes aéreas de la planta de maíz y su proporción en peso en base a peso seco¹³.

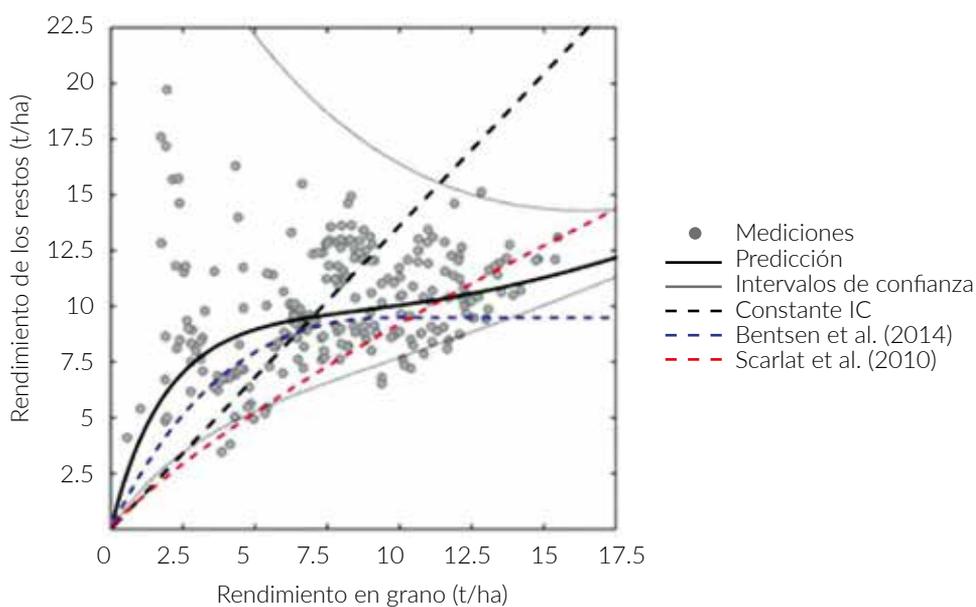


FIGURA 4:

Modelo empírico para la predicción del rendimiento de restos del cultivo de maíz en función del rendimiento en grano¹⁴.

¹³ David Ertl Sustainable corn stover harvest / Iowa Corn Promotion Board, 2013. - 18 p. https://www.researchgate.net/publication/319493290_Sustainable_Corn_Stover_Harvest_A_publication_of_the_Iowa_Corn_Promotion_Board

¹⁴ García-Condado S, López-Lozano R, Panarello L, et al. Assessing lignocellulosic biomass production from crop residues in the European Union: modelling, analysis of the current scenario and drivers of interannual variability. GCB Bioenergy. 2019;00:1-23. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12604>



FIGURA 5:

Restos de cultivo de maíz abandonados en campo después de la cosecha.

La parte aérea de la planta (cañote de maíz) restante tras la cosecha puede recogerse en campo y obtenerse un valor comercial de ellos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que algunos restos de las partes aéreas y todas las partes subterráneas del maíz se suelen dejar en el campo, desempeñando un papel clave como fertilizantes orgánicos (Fig. 5). Por eso, las prácticas adecuadas de gestión de estos restos son esenciales para la calidad del suelo, por lo que las tasas apropiadas de retirada deben basarse en el nivel mínimo de restos que debe mantenerse en el suelo para mantener su calidad y su cantidad de materia orgánica y para reducir el riesgo de erosión¹⁵. Los aspectos de sostenibilidad de la recolección de los subproductos de la producción de grano de maíz se describen en el capítulo "Aspectos de sostenibilidad en la utilización de los restos del cultivo de maíz" de esta guía. Según la literatura, las tasas de eliminación sostenible de los restos de campo del maíz se estiman entre el 25% y el 70%, por lo que, en la evaluación en esta guía del potencial energético de la biomasa, se ha considerado una tasa de eliminación de los restos de maíz del 40%.

La producción de restos de campo y subproductos agrícolas, como es el caso de los restos de campo del cultivo de maíz, es estacional y depende de los períodos de cosecha. El maíz se cosecha en diferentes fechas, según la variedad, el lugar de cultivo y la época de siembra. Por lo general, el marco temporal para la cosecha del maíz (para grano) está determinado por el nivel de humedad del grano, por lo que antes de la cosecha, los agricultores determinan su contenido de humedad y su madurez, teniendo en cuenta la fecha de la siembra y el momento teórico de maduración. Además, hay que tener en cuenta que el contenido de humedad de las diferentes partes del maíz no es homogéneo y disminuye rápidamente en los 120 días siguientes a la fecha de siembra¹⁶. En Europa, el período típico de cosecha del grano de maíz es de septiembre a noviembre. Cabe señalar que algunos agricultores cosechan el maíz en diciembre, enero e incluso más tarde. Sin embargo, no se debe a requisitos agro-técnicos, sino a algunas necesidades de producción y a la viabilidad económica.

¹⁵ Nicolae Scarlat, Milan Martinov, Jean-François Dallemand *Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use / Waste Management, Volume 30, Issue 10, October 2010, Pages 1889-1897. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.016>*

¹⁶ C. Igathinathane, Alvin R.Womac, Shahab Sokhansanj, Lester O.Pordesimo. *Vertical Mass and Moisture Distribution in in Standing Corn Stalks // 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting (Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August, 2004). - 20 p.*

Durante la cosecha, el cañote de maíz suele estar más húmedo (> 30%) que el grano (la humedad estándar de la UE es 14%), pero después de la cosecha del grano, su humedad se evapora rápidamente favorecida, por ejemplo, por el viento. Además, el contenido de humedad de los restos de la cosecha de maíz depende en gran medida de las condiciones meteorológicas durante la cosecha, pudiendo las lluvias intensas dar lugar a condiciones muy desfavorables para la cosecha de biomasa destinada a aplicaciones energéticas.

Para el cálculo del potencial energético de los restos de maíz se ha utilizado el poder calorífico inferior (PCI) o poder energético neto (en base seca) de 17,5 MJ/kg¹⁷ (Fig. 6). La distribución del potencial energético de los restos de maíz en Europa no es uniforme. En 2019, la mayor concentración de restos de maíz, con un equivalente energético de 302,5 PJ, se encontraba en Ucrania. En la UE, los líderes fueron Rumanía (155,2 PJ), Francia (97,5 PJ) y Hungría (64,8 PJ), aunque países como España, Grecia o Bélgica también tienen potencial en este aspecto. En total, en 2019, el potencial energético total de los restos de maíz en la UE fue de 557,9 PJ.

Pero en realidad, el acceso a dicho potencial energético

de restos del cultivo de maíz está en manos de los agricultores. Ellos se encargan de cosechar de forma sostenible los restos de maíz si estos tienen un interés económico. Y es que el precio de los restos de maíz en el mercado depende de las características finales de la agrobiomasa, que son importantes para los usuarios finales. Las distintas partes de los restos de maíz tienen diferentes características fisicoquímicas, pero en general se trata de biomasa lignocelulósica. Las principales formas de utilización del grano y los restos de maíz se muestran en la Fig. 7. El cañote de maíz tiene un valor nutritivo relativamente bajo, especialmente los tallos, que se consideran forraje de baja calidad¹⁸. El valor nutritivo de las hojas y las envolturas (o cáscaras) de maíz es mayor que el de los tallos y el zuro, pero todavía no se utilizan en grandes volúmenes. Actualmente, el cañote de maíz se deja principalmente en el campo y se incorpora al suelo. Cabe señalar que, en algunos territorios, los restos de cosecha, incluidos los del maíz, se queman en el campo, lo que provoca numerosas consecuencias negativas para el medio ambiente¹⁹. Por lo tanto, los recursos existentes de restos de maíz podrían utilizarse como materia prima de agrobiomasa para biocombustibles sólidos, bioetanol de segunda generación o biogás.



FIGURA 6: Potencial energético de los restos del cultivo de maíz en Europa (2019).

¹⁷ Caroline Schneider, Hanz Hartmann *Maize as energy crop for combustion. Agricultural optimization of fuel supply. TFZ, 2006.* http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/09_bericht.pdf

¹⁸ *Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products. Report of the AgroCycle project. 2016.* http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

¹⁹ Vladislav Zekić, Vesna Rodić, Milenko Jovanović *Potentials and economic viability of small grain residue use as a source of energy in Serbia. Biomass and Bioenergy, 2010. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.07.012*

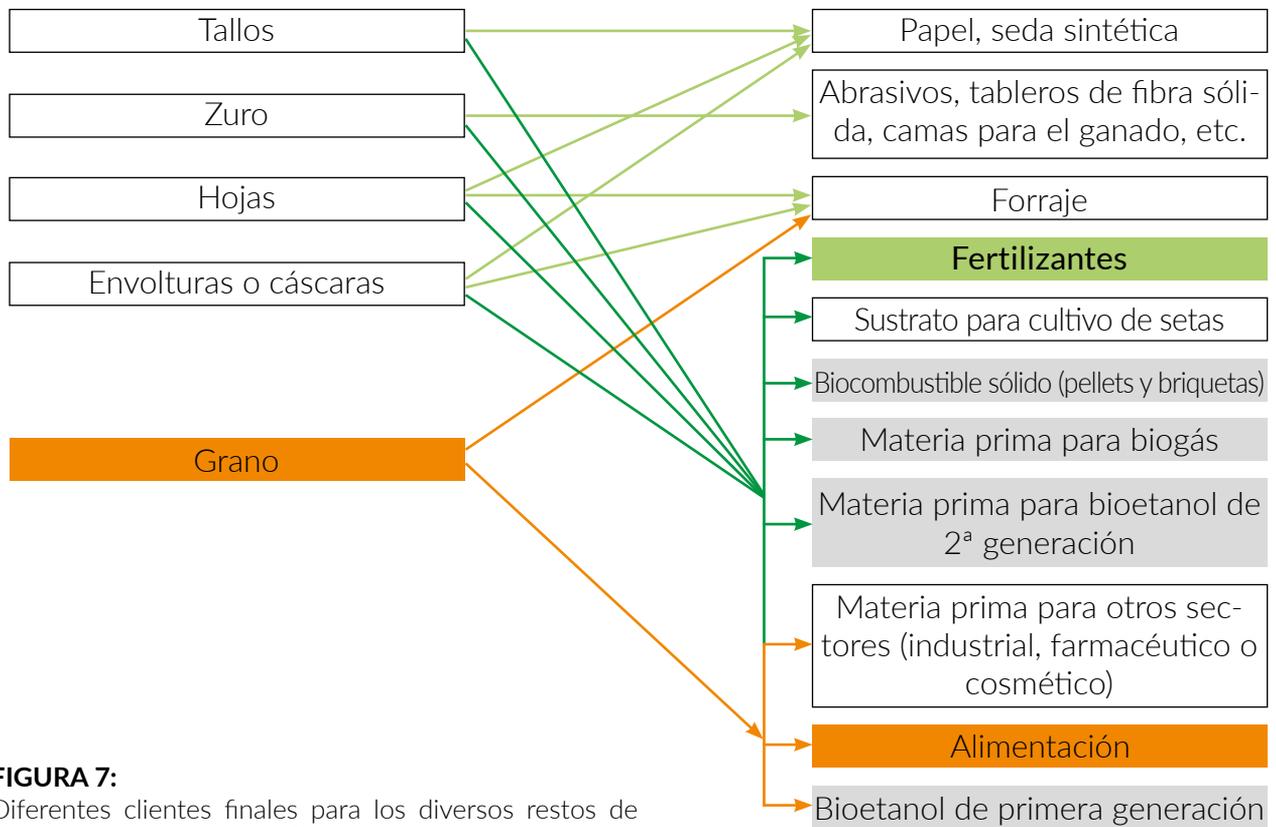


FIGURA 7: Diferentes clientes finales para los diversos restos de campo del cultivo de maíz²⁰.



²⁰ Position paper UABIO N 23 (2020) "Analysis of pellets and briquettes production from corn residues" <https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/05/position-paper-uabio-20-en.pdf>

PROPIEDADES COMO COMBUSTIBLE DE LOS RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

En general, los restos de maíz tienen unas propiedades como combustible complicadas, que, sin embargo, son mejores que las de la paja de cereal. En cualquier caso, a la hora de elegir una caldera para restos de maíz, deben tenerse en cuenta las características reales como combustible del mismo y los requisitos de los fabricantes de calderas. En el table 2 se comparan las propiedades como combustible de los restos de maíz con las de otros restos agrícolas, así como las de la astilla de madera.

TABLA 2:

Comparación de las propiedades como combustible de las distintas fracciones de los restos de campo del cultivo de maíz con respecto a diferentes tipos de biomasa.

Parámetros	Unidades	Paja de cereal (amarilla) ¹	Paja de cereal (gris) ¹	Zuro maíz ²	Cañote de maíz ³	Astilla forestal ¹
Humedad	%	10-20	10-20	12.5	10-18	40-50
Poder calorífico inferior - PCI	MJ/kg	14.4	15	15.2	15-17	10.4
Cenizas	%wt	4	3	2.2	5-6.5	1
Carbono	%wt	42	43	41.3	41	50
Hidrógeno	%wt	5	5	5.2	5.1	6
Oxígeno	%wt	37	38	38.8	38	38
Cloro	%wt	0.75	0.2	0.14	0.13	0.02
Nitrógeno	%wt	0.35	0.41	0.5	0.84	0.3
Azufre	%wt	0.16	0.13	0.08	0.09	0.05
Potasio	%wt dry	1.03*	0.61**	0.48-1.02	0.61	0.14***
Temperatura de deformación de la ceniza	°C	930*	905**	790-1200 (1033 Valor medio)	820-1160 (1070 Valor medio)	1270***

¹ El uso de paja para producción de energía. Tecnologías, políticas y la innovación en Dinamarca. Segunda edición. (https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/Straw-to-Energy_AgroBioHeat_Spanish_web.pdf).

² Datos agregados procedentes de la base de datos Phyllis (<https://phyllis.nl/>); Brunner et al., 2011²¹; Brunner et al., 2021²²; Antonenko et al., 2018²³; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf.

³ Datos agregados procedentes de la base de datos Phyllis (<https://phyllis.nl/>); Antonenko et al., 2018²³; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

* Valor medio para la paja de trigo (en Dinamarca) procedente de la base de datos Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

** Valor medio de la paja de trigo (en Dinamarca, envejecida) de la base de datos Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

*** Valor medio de la madera no tratada de la base de datos Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

²¹ Brunner, T., Kanzian, W., Obernberger, I., & Theissl, A. (2011). Combustion properties of maize cobs – results from lab and pilot-scale tests. In *Proceedings of the 19th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 944-951).

²² Brunner, T., Nowak, P., Mandl, C., Obernberger, I. (2021). Assessment of agrobiomass performance in state-of-the-art residential boilers. In *Proceedings of the 29th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 379-388).

²³ V.O. Antonenko, V.I. Zubenko, O.V. Epik Fuel properties of Ukrainian corn stover. DOI <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.11>

La composición elemental de los restos de maíz es casi la misma que la de la paja de los cultivos de cereales, por lo que tienen un valor calorífico comparable. Las propiedades de la paja dependen en gran medida del lugar de cultivo, el momento de la cosecha y el clima, el suelo y los fertilizantes²⁴.

El contenido en cenizas de los restos de cultivo de maíz es un factor de calidad importante para la producción posterior de biocombustibles. El contenido de cenizas depende del tipo de tecnología de cosecha, ya que la cantidad de cenizas aumenta cuando la biomasa entra en contacto con el suelo. Por ello, existen dos tipos de cenizas: estructurales y no estructurales²⁵. Las cenizas estructurales están formadas por sustancias inorgánicas contenidas en la biomasa vegetal. El contenido habitual de cenizas estructurales del cañote de maíz es del 3,5%. Las cenizas no estructurales son sustancias inorgánicas (principalmente tierra) que se incorporan a la paja durante la cosecha, en particular al formar las hileras y el empaclado. El contenido total de este tipo de cenizas en las múltiples pasadas de las máquinas agrícolas durante la cosecha es del 8-10%.

En cuanto al comportamiento de fusibilidad de las cenizas, algunas muestras de restos de maíz se acercan

más a la biomasa de la madera, lo que proporciona mejores condiciones para la combustión en comparación con la paja de los cultivos de cereal de invierno. A modo de comparación: la temperatura de deformación de las cenizas para la madera es de unos 1270 °C, mientras que para el zuro de maíz es de 790-1200 °C y para los tallos del maíz de 820-1160 °C (ver Tabla 2). Además, el cañote de maíz contiene menos cloro (0,13%) en comparación con la paja fresca ("amarilla") de los cultivos de cereales de invierno (0,75%). Este es un factor positivo para el uso de los restos de maíz como combustible porque los compuestos de cloro provocan la corrosión de los elementos de acero de los equipos energéticos.

El contenido de humedad influye de forma decisiva en el poder calorífico de los restos de maíz. El diagrama de la dependencia del poder calorífico inferior (PCI) en función del contenido de humedad del cañote de maíz, que se basa en la ecuación (2.2) del "Manual de combustión y co-combustión de biomasa de Van Loo y Koppejan"²⁶, se muestra en la Fig. 8.

Para conseguir un contenido de humedad relativamente bajo en los restos de maíz, es esencial elegir una estrategia de cosecha y logística adecuada.

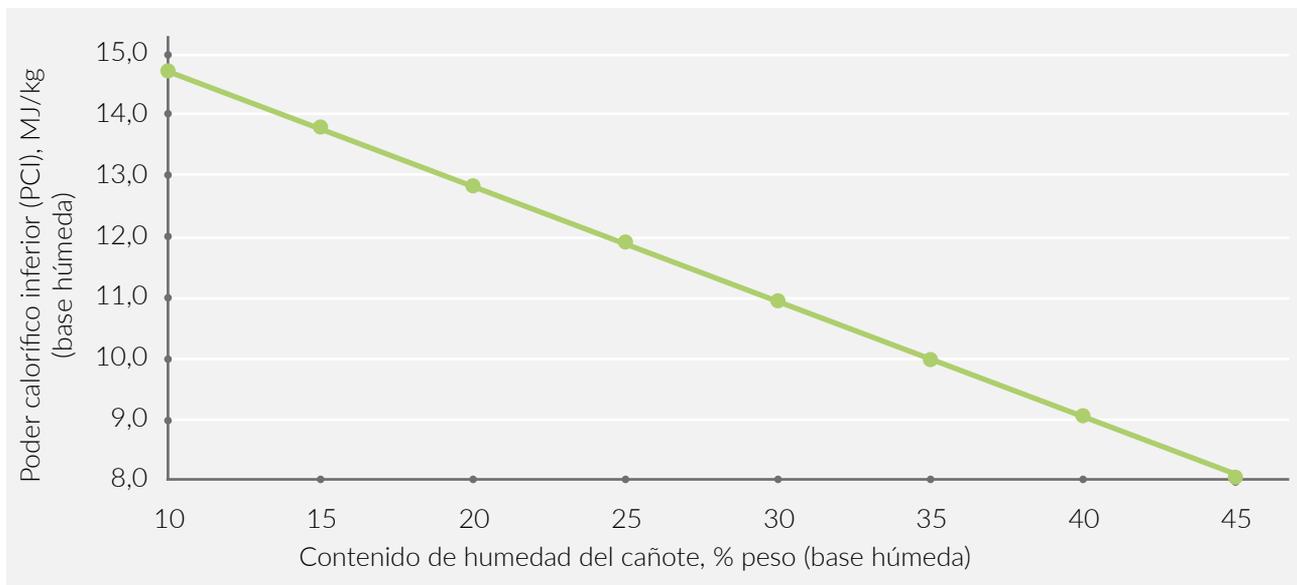


FIGURA 8:

Poder calorífico inferior (PCI) en función del contenido de humedad (base húmeda) del cañote de maíz.

²⁴ Vyll Varesa. *Handbook for biofuel consumer* // Tallinn: Tallinn Technology University, 2005 – 183 p.

²⁵ Brittany Schon, Matt Darr. *Corn Stover Ash*. <https://store.extension.iastate.edu/Product/Corn-Stover-Ash>

²⁶ Van Loo, S.; Koppejan, J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*; Earthscan: London, UK, 2008. – 465 p.

COSECHA DE LOS RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

TECNOLOGÍAS DE RECOLECCION DEL GRANO DE MAIZ

El método de recolección del grano de maíz tiene un impacto directo en los tipos de restos que se pueden obtener y en la forma de recogerlos. Existen tres tipos principales de máquinas para la cosecha del grano de maíz (Fig.9):

1. Cosechadoras de grano con el posterior tratamiento de las mazorcas:
 - 1.1. con pelado simultáneo de las mazorcas;
 - 1.2. sin pelado de las mazorcas;
2. Cosechadoras de grano equipadas con cabezales;
3. Cosechadoras de grano con recogida de mezcla de grano y zuro.

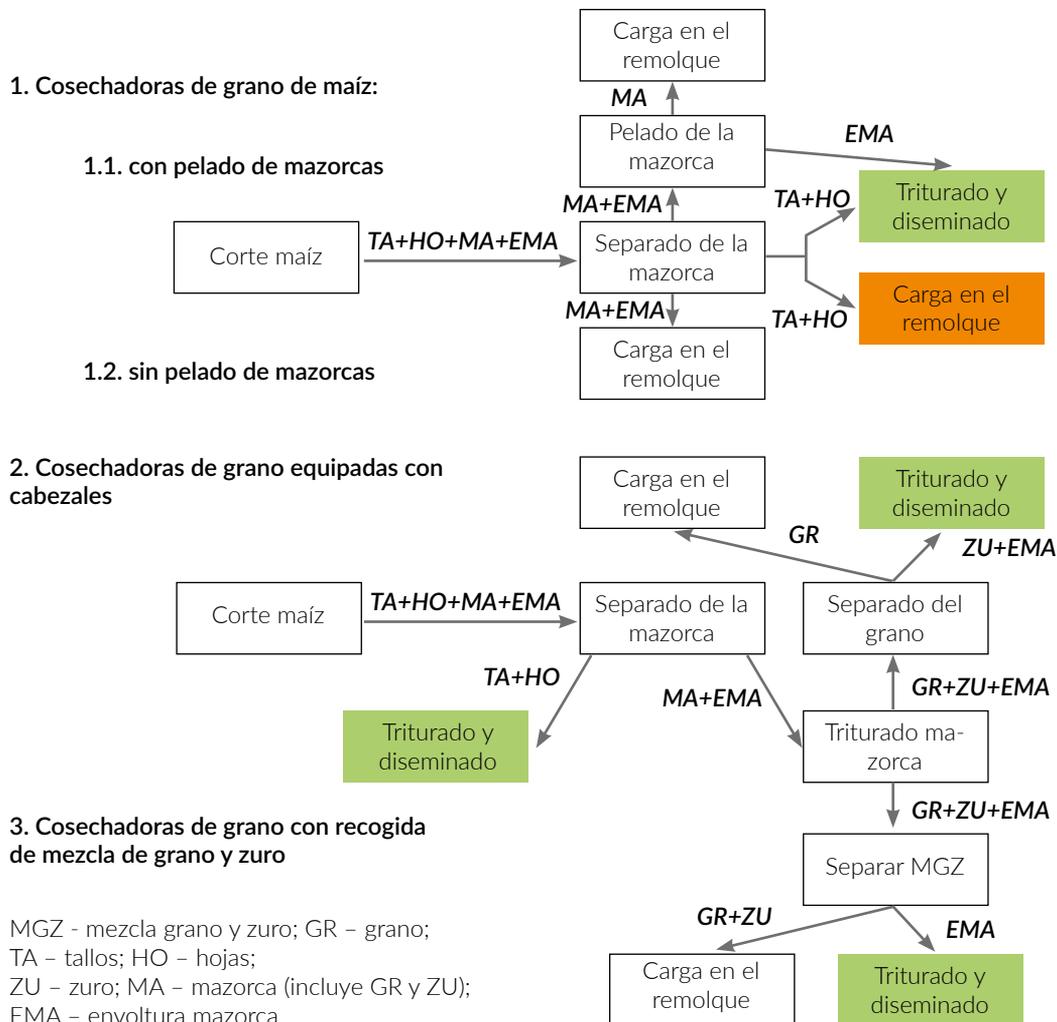


FIGURA 9: Cosechadoras de maíz en grano y los flujos de sus subproductos²⁷.

²⁷ UABio's Position Paper N 16 (2016) "Opportunities for harvesting by-products of grain corn for energy production in Ukraine" <http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-16-en.pdf>



FIGURA 10:
Cosecha de maíz con cosechadora desgranadora con cabezal.

El grano de maíz debe cosecharse con un contenido de humedad del 20 al 35-40%, mientras que la mezcla de grano y zuro debe cosecharse cuando el contenido de humedad del grano sea del 40-50%. Por su lado, la cosecha de maíz sin trillado de mazorcas comienza cuando la humedad del grano es inferior al 40%, mientras que si hay trillado de mazorcas debe de ser con menos del 30%. El motivo es que con un mayor contenido de humedad la trilla empeora y el maíz se daña, y por tanto, la productividad de las cosechadoras se reduce. Por eso, la mejor calidad de trilla tiene lugar cuando la humedad del grano es del 20-22%²⁸.

En Ucrania, en la década de los 80 se hizo popular el empleo de maquinaria específica para la recolección del maíz, que incluía la recogida de todo el cultivo mediante el uso de cosechadoras SK-5M, Enisei-1200, Don-1500 y KZS-9-1 con cabezales especiales PPK-4, KMD-6, PZKS-6 producidos por la fábrica "Kherson-mash". Estos cabezales se caracterizan porque transmiten directamente los restos de la planta de maíz triturados al remolque.

En la actualidad, el método principal de cosecha del grano de maíz consiste en el uso de cosechadoras desgranadoras que incluyen el triturado y el diseminado de la biomasa cortada (Fig. 10). Este método de cosecha del grano de maíz es el más viable económicamente ya que, en comparación con la cosecha de la mazorca entera con envolturas, el método proporciona una disminución de 1,8-2 veces en los costes de mano de obra y una reducción del 20-25% en el consumo de combustible²⁹. Sólo algunos agricultores (principalmente los relacionados con las fábricas de semillas) recogen el maíz en forma de mazorcas enteras no trilladas. Esto es debido a que las fábricas de semillas cultivan el maíz (híbrido) para obtener stock de semillas para años siguientes. Finalmente, en comparación con la UE, el empleo de cosechadoras de mezcla de grano y zuro (MGZ) no está todavía muy extendida en Ucrania.

²⁸ V.D. Hrechkosii, M.D. Dmytryshak, R.V. Shatrov and other. *Complex mechanization of grain production: Textbook* // K: Ltd. "Nilan-Ltd", 2012 - 288 p.

²⁹ Cherenkov A.V., Tsykov V.S., Dziubetskyi B.V., Shevchenko M.S. et al. *Intensification of corn technologies - a guarantee for yield stabilization at 90-100 m.c./ha level (practical recommendations)* // Dnepropetrovsk: NU Institute of Steppe zone agriculture NAASU, 2012 - 31 p.

OPCIONES DE COSECHA DE LOS RESTOS DE MAÍZ

Al cosechar el maíz con una cosechadora de grano equipada con cabezal, las partes vegetales se redistribuyen de la siguiente manera (Fig. 11): restos de la planta que permanecen en el campo (10% del peso del grano), restos vegetales sin cortar (96% del peso

del grano) y restos dispersados tras el proceso por la cosechadora (24% del peso del grano). Hay que tener en cuenta que los cabezales requieren mucha potencia. Normalmente, son 7,5 kW (10 CV) por hilera y se requiere una potencia adicional de 2,3 kW (3 CV) por hilera en el cabezal si se instalan accesorios de trituración de tallos³⁰.

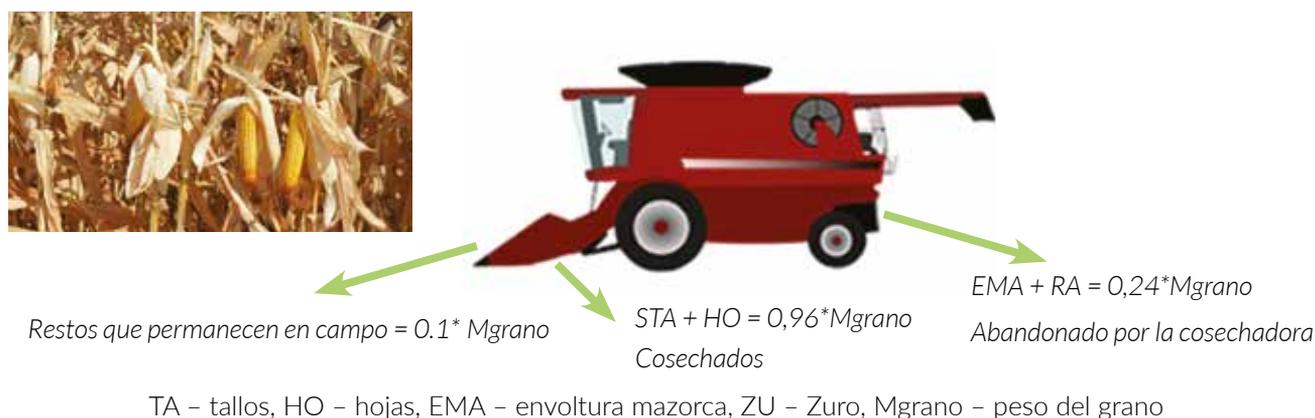


FIGURA 11:

Generación de restos de maíz durante el empleo de la cosechadora.

Densificar la biomasa generada produciendo pacas supone aumentar en 4 veces la densidad de esta (de 40 kg/m^3 a más de 160 kg/m^3), contribuyendo de esta forma a aumentar la eficiencia logística y reducir la superficie necesaria de los almacenes. Existen 4 técnicas principales para la producción de pacas durante la recolección de los restos de maíz:

1. 1. Sistema en una sola pasada: se acopla una empacadora a una cosechadora que permite formar pacas al mismo tiempo que se cosecha el grano (Fig. 12a).
2. 2. Sistema de dos pasadas: una cosechadora con un cabezal que corta las filas del maíz, y después se pasa una empacadora acoplada a un tractor (Fig. 12b).
3. 3. Sistema de tres pasadas: cosechadora + tractor con triturador de tallos + tractor con empacadora (Fig. 12c).
4. 4. Sistema de varias pasadas: cosechadora + tractor con trituradora de tallos + tractor con rastrillo

+ tractor con empacadora (Fig. 12d).

El cañote (o restos de planta de maíz) cosechado con el sistema de varias pasadas suele dar lugar a niveles de contenido de cenizas entre el 8 y el 12%, dependiendo del año y de las condiciones del cultivo. Este contenido tan alto se debe principalmente a la contaminación procedente del suelo durante el proceso de empacado. Sin embargo, la cosecha en una sola pasada produce unas pacas de cañote de maíz con un contenido de cenizas inferior al 4% ya que no permite que los restos de la planta lleguen al suelo hasta que no se forme la paca (Fig. 12a). Pese a todo, las cosechadoras de una sola pasada tienen una pérdida de rendimiento en la cosecha debido al flujo adicional de biomasa a través de ellas. Se ha calculado que las cosechadoras diseñadas para manejar tasas de biomasa muy altas tienen una reducción del 30% en el rendimiento a tasas de recolección de biomasa de $3,4 \text{ Mg/ha}$ ³¹. Este tipo de sistemas de recolección en una sola pasada no son muy comunes, pero empresas como AGCO (modelo Challenger) sí que las comercializan en algunos países, como EE. UU.

³⁰ Corn: Chemistry and Technology, Third Edition. Edited by Sergio O. Serna-Saldivar Woodhead Publishing and AACC International Press, 2018. – 690 p.

³¹ J. Darr, K. Webster, A. Shah Machinery Innovations to Meet Industrial Biomass Harvesting Demands in Expanding United States Markets / Land.Technik AgEng 2013. Conference Proceedings, 2013. – 399-406 p.



a) Sistema en una sola pasada: cosechadora con empacadora



b) Cosechadora con cabezal + tractor con empacadora



c) Cosechadora + tractor con triturador de tallos + tractor con empacadora



d) Cosechadora + tractor con trituradora de tallos + tractor con rastrillo + tractor con empacadora

FIGURE 12:

Técnicas de recolección de restos del cultivo de maíz³².

Para que la recogida y el empaque de los restos de cultivo del maíz sean eficaces, es importante hacer hileras con ellos. En el sistema de dos pasadas, se utiliza una cosechadora con un cabezal especial que forma una hilera con los restos de campo de maíz (Fig. 12b). Por ejemplo, el cabezal Geringhoff Mais Star Collect puede triturar y esparcir las hojas y los tallos en el campo o introducirlos en la hilera. En la parte superior de la hilera también se pueden añadir los zuro y envolturas trituradas que se forman después de la trituradora de la cosechadora. Por su parte, la empresa

New Holland produce dispositivos - Cornrower™ para formar hileras, que se pueden acoplar a la cosechadora. Las pruebas de campo comparativas de la cosecha de restos de maíz de una y dos pasadas mostraron que el rendimiento de los sistemas de dos pasadas era un 9% inferior al sistema de una pasada³³. Además, para estos dos tipos de cosecha, los agricultores tienen que invertir en equipos especiales (sistema de cosecha de una pasada o cabezales), lo que reducirá la productividad de la cosecha.

³² Report on "Analysis of utilisation of corn straw as an energy source" (2018). Prepared by SEC Biomass for EBRD under the Contract C38842/1018/5362.

³³ K. J. Shinnars, R. G. Bennett, D. S. Hoffman Single- and two-pass corn grain and stover harvesting Transactions of the ASABE. 55(2): 341-350. (doi: 10.13031/2013.41372) @2012 <https://elibrary.asabe.org/login.asp?search=0&JID=3&AID=41372&CID=t2012&v=55&i=2&T=2>

Por lo general, los agricultores no disponen de los recursos necesarios para realizar la cosecha de la biomasa del maíz, ya que su objetivo es producir grano. Por eso, los agricultores tienden a cosechar el grano de maíz con cosechadoras y cabezales estándar para evitar aumentar la duración de la campaña de recolección. En este caso, para poder cosechar eficazmente los restos de campo del maíz, es mejor contratar a una empresa externa que disponga de maquinaria especial para recoger la agrobiomasa con buena calidad y de una forma eficiente. Esto da lugar a sistemas de recolección de tres pasadas o de varias pasadas.

En el sistema de tres pasadas, se emplea una trituradora de tallos (Fig. 12c). En este caso, la cosechadora puede aumentar su rendimiento durante la recolección del grano de maíz con respecto a los sistemas de uno o dos pasadas. La empresa estadounidense Hiniker produce máquinas de la serie 5600 con un ancho aproximado de 4,5, 6 y 9 metros para la trituración y el hilerado de restos de cultivos. Eso sí, la trituradora de 9 metros debe acoplarse a un tractor con una potencia de motor de al menos 200 CV.

En el sistema de varias pasadas, se utiliza una trituradora acoplada a un tractor para triturar los restos de campo del maíz, que son rastrillados por un rastrillo acoplado al tractor en el siguiente paso (Fig. 9d). Para operar con los tallos de maíz, el rastrillo debe estar equipado con dedos más fuertes que los que se utiliza en un rastrillo de heno. Al igual que los rastrillos, el rendimiento de cosecha de las trituradoras de tal-

los puede ajustarse modificando la distancia entre las cuchillas de trituración y el suelo. Debido a que las trituradoras de tallos tienen menos oportunidad de engancharse al suelo, el nivel final de cenizas de los restos de maíz obtenidos de esta manera es generalmente menor que con un sistema de tres pasadas³⁴.

Para evitar las pérdidas de materia seca y el deterioro de la calidad de la biomasa, las pacas deben sacarse rápidamente del campo y colocarse en pilas para su almacenamiento. Por ejemplo, un remolque autocargador 16K Plus Bale Runner recoge 12 pacas grandes de 1,2 m de anchura y 0,9 m de altura en una sola pasada si se monta en un tractor con al menos 180 CV de potencia. En EE. UU. también se utilizan apiladores especiales autopropulsados. La máquina Stinger Stacker 6500 tiene una capacidad de motor de 305 CV, transmisión automática de 6 velocidades y durante 1 hora puede recoger, sacar y colocar en una pila de 80 a 120 pacas rectangulares grandes.

De estas tecnologías, el sistema de tres pasos (Fig. 12c) es el más fácil de aplicar a las condiciones europeas debido tanto a la posibilidad de utilizar la maquinaria estándar como al menor contacto de la biomasa con el suelo. En las diferentes etapas del proceso de cosecha, se pueden utilizar diferentes modelos. En la Fig. 13 se muestran algunos ejemplos de este tipo de maquinaria. Además, en el Anexo I se incluye más información sobre la maquinaria para la recolección, la logística y la transformación en pellets/briquetas de los restos de maíz.



Empleados en EE. UU.	Análogo en UE
1. Corte	
Hiniker 5600 series	Biochipper 300, 400, 500, 600
2. Empacado	
Massey Ferguson 2270XD	Krone Big Pack 1290 HDP
3. Recogidas de pacas en campo	
ProAg 16 K Plus Bale Runner	Arcusin Autostack XP 54T



FIGURA 13: Modelos de maquinaria agrícola para la recolección de restos del cultivo de maíz.

³⁴ Matt Darr *Industrial harvesting of corn stover as a biomass* (2012). *Proceedings of the Integrated Crop Management Conference*. 9. <https://lib.dr.iastate.edu/icm/2012/proceedings/9>

LA CADENA DE SUMINISTRO DE RESTOS DE MAÍZ DE DUPONT

En la Fig. 14 se presenta un ejemplo de la cadena de suministro de restos de maíz (biomasa empacada). Se trata de la cadena de suministro implementada y utilizada por la empresa DuPont Cellulosic Ethanol LLC (EE. UU.) para suministrar materia prima a su planta de etanol celulósico. Esta planta se inauguró el 30 de octubre de 2015 en la ciudad de Nevada, en el estado de Iowa. La capacidad de la planta es de más de 110 millones de litros de etanol celulósico al año. El maíz es cosechado por los agricultores locales, mientras que las demás operaciones son realizadas por el personal de la planta. En 2018, Verbio North America Corp. compró la empresa DuPont y el nuevo propietario tiene intención de producir también gas natural renovable (GNR) en esa planta, aunque primero tendrá que hacer algunos cambios en la instalación si quiere llevarlo a cabo³⁵.



FIGURA 14: Modelo de planta de etanol celulósico de DuPont para la cadena de suministro de restos de cultivo de maíz³⁶.

³⁵ <http://ethanolproducer.com/articles/15885/burgeoning-biomethane>

³⁶ DuPont Nevada Site Cellulosic Ethanol Facility Feedstock Collection Program

http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/industrial-biotechnology/documents/IB-PDF-04-Feedstock_Collection_Program_2015.pdf

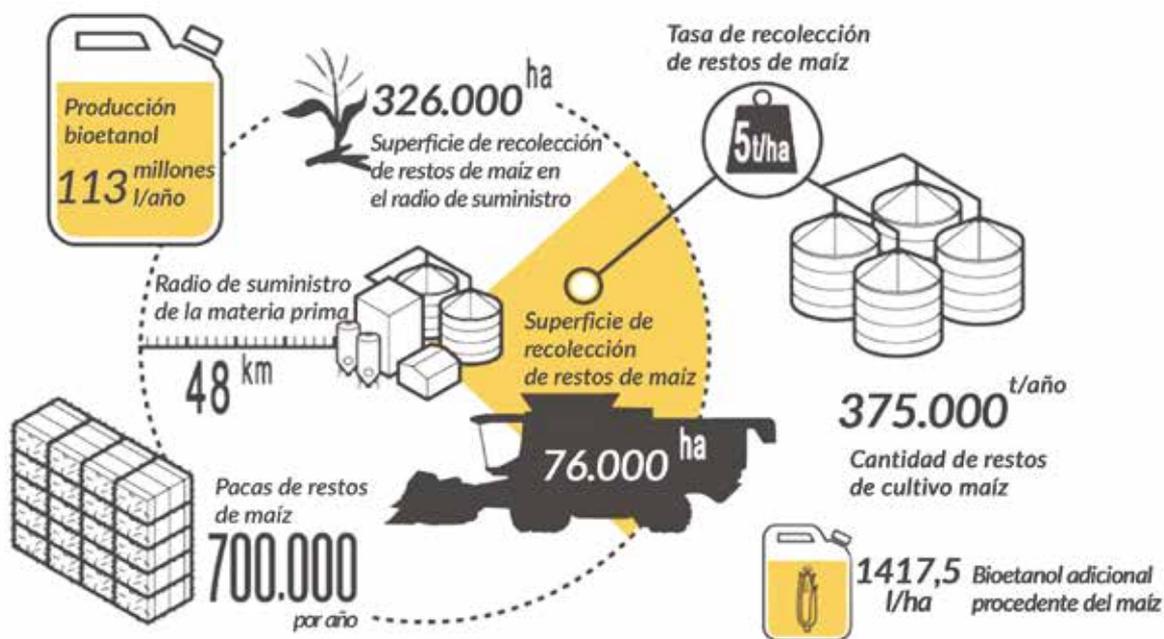


FIGURA 15: Programa de funcionamiento de la planta de bioetanol celulésico de DuPont³⁷.

El programa de operaciones se muestra en la Fig. 15. La planta de DuPont pagaba a los agricultores por el permiso para cosechar los restos del cultivo de maíz y gestionaba los costes de recolección, almacenamiento y transporte. Los agricultores obtenían ingresos por dar acceso al campo y por las cantidades de nutrientes que se retiraban junto con los subproductos del maíz. Los restos del cultivo de maíz se recogían en las 500 explotaciones más cercanas. Había 85 puestos de trabajo permanentes en la planta y 150 personas participaban en la recogida, el transporte y el almacenamiento de la materia prima estacional.

Debido al programa de cosecha de restos de cultivo de maíz para etanol celulésico de DuPont, esta empresa contrataba a agricultores para cosechar, almacenar y entregar los restos a la planta. Eso sí, los campos de cultivos de estos agricultores debían de cumplir los siguientes criterios:

- Estar situados en un radio de 48 km de Nevada, Iowa;
- Cultivarse en un sistema sin laboreo o con agricultura de conservación;
- Rendimiento de 12,2 t/ha o superior;
- Terreno llano (con pendiente inferior al 4%).

TRANSPORTE DE PACAS DE CAÑOTE DE MAÍZ

También, de forma similar a lo descrito anteriormente, el sistema de recolección de restos de cultivo de maíz (cañote) en grandes pacas cuadradas es utilizado por otras empresas. Después de apilar las pacas en los almacenes operativos cercanos a los campos, deben ser transportadas al almacén principal. Para las operaciones de carga en los almacenes se utilizan cargadores frontales y manipuladores telescópicos. Para el transporte desde el almacén local al principal, se utilizan camiones con plataformas de semirremolque. Estos equipos se utilizan tradicionalmente para las operaciones logísticas con pacas de paja y heno. Pero las pacas de cañote de maíz suelen tener un mayor contenido de humedad y, por lo tanto, son más pesadas en comparación con las pacas de paja de cereales y colza, por lo que debe tenerse en cuenta este aspecto a la hora de elegir las máquinas para recoger y apilar las pacas. Es esencial asegurar la carga adecuadamente utilizando correas de amarre o de trinquete en los remolques de plataforma o en los remolques sin barreras laterales³⁸. En un semirremolque estándar estadounidense de 14,6 m se pueden transportar hasta 36 pa-

³⁷ nol-by-the-numbers.html

³⁸ Justin McGill, Matt Darr Transporting Biomass on Iowa Roadways. PM 3051G (2014) <https://store.extension.iastate.edu/product/Transporting-Biomass-on-Iowa-Roadways>

cas cuadradas grandes con un peso medio en seco de 0,43 t. La densidad de las pacas secas debe ser de 196 kg/m³ para maximizar la eficiencia de transporte del peso de los semirremolques estándar. Las cargas de biomasa deben estar bien aseguradas para que no se desplacen durante el transporte.

RECOGIDA DE CAÑOTE DE MAÍZ EN PACAS REDONDAS

Además, la biomasa puede empacarse utilizando una empacadora para pacas redondas en lugar de para pacas cuadradas. Las empacadoras redondas también son muy viables para la producción de biomasa y ofrecen la ventaja de ser más sencillas de manejar y con menos problemas de mantenimiento³⁹. Las empacadoras para pacas redondas pueden requerir hasta 75 CV. Aunque para obtener una potencia de tracción adecuada y maximizar la productividad de la empacadora, se recomienda utilizar un tractor de más de 120 CV. Las empacadoras de pacas redondas de alta densidad con pretratamiento de picado pueden alcanzar densidades de paca de 160 kg/m³. Además, las empacadoras de pacas cuadradas de gran tamaño requieren una potencia considerablemente mayor que las

de pacas redondas, con un mínimo de 180 CV según las recomendaciones del fabricante, aunque es posible que se necesiten más CV si se utilizan empacadoras de alta densidad. Estas empacadoras pueden producir pacas de más de 184 kg/m³ de densidad. Pero, en general, las empacadoras de pacas redondas son menos productivas que las de pacas cuadradas. Por lo tanto, teniendo en cuenta la menor eficiencia del volumen de transporte y almacenamiento, las operaciones logísticas de las pacas redondas en comparación con las de pacas cuadradas son más complejas y caras.

RECOLECCIÓN DE CAÑOTE DE MAÍZ TRITURADO

Además de las tecnologías de empacado comentadas anteriormente, hay que tener en cuenta que el cañote o resto de campo del cultivo de maíz puede cosecharse en forma de triturado como una mezcla de diferentes fracciones o por separado, como el zuro. En la Figura 16 se muestran los diagramas de flujo de la cosecha de restos de cultivo de maíz triturados con el uso de una cosechadora de forraje o un vagón cargador de forraje, que se utilizan para la cosecha de maíz ensilado. Los experimentos de campo realizados en el Centro



a) Sistema de cosecha de forraje:
cosechadora + tractor con rastrillo de tallos + cosechadora de forraje + tractor con remolque



b) Sistema de vagón cargador de forraje:
cosechadora + tractor con triturador de tallos + tractor con vagón cargador de forraje

FIGURA 16:
Cadena de suministro de restos de maíz triturados.

³⁹ Matt Darr, Keith Webster *Corn Stover Harvesting Machinery*. PM3051A (2014)
<https://store.extension.iastate.edu/product/Corn-Stover-Harvesting-Machinery>

Estatal de Investigación Agrícola de Baviera en 2014 y 2015 muestran que el contenido de cenizas de este subproducto fue del 7,0 % en MS \pm 1,9 para la cosechadora de forraje y del 6,9 % en MS \pm 2,0 para el vagón cargador de forraje⁴⁰.

SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE ZUROS DE MAÍZ

Otra opción para la recolección de los restos de cultivo de maíz es recoger una parte de ellos después de trillar el grano en una cosechadora. En 2018, los investigadores del CREA-IT italiano (Consiglio per la Ricerca

in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria) realizaron ensayos sobre el terreno en el marco del proyecto BECOOL para evaluar el rendimiento de un innovador sistema mecanizado, denominado Harcob, para recoger zuro de maíz⁴¹ (Fig. 17a). Utilizando una cosechadora con este sistema Harcob, fue posible cosechar una media de 2 t/ha de zuro (4,1 t/hora)⁴². Por su parte, la empresa Vermeer ha lanzado una máquina cosechadora de zuro CCX770 (Fig. 17b), ya disponible en el mercado⁴³, y que consiste en un vagón de recogida de zuro acoplado a una cosechadora. Esta maquinaria permite a los agricultores cosechar tanto el maíz como los zuro -por separado y simultáneamente- en una sola pasada.



a)



b)

FIGURA 17:

Cosechadoras de zuro: a) Sistema Harcob; b) Vermeer CCX770.

En Ucrania, algunos agricultores usan este sistema de tal modo que el grano con el zuro se transfiere directamente a la tolva de grano. A continuación, esta mezcla se separa, y el zuro se utiliza como biomasa para los secadores de grano de maíz. La tecnología descrita se basa en la maquinaria existente y no necesita ningún gasto en equipos adicionales. Sin embargo, sólo se utiliza para cubrir las necesidades energéticas propias de los agricultores y no es aplicable a la recogida a gran escala de este tipo de biomasa para el sector de la bioenergía.

ALMACENAMIENTO DE CAÑOTE DE MAÍZ

El cañote de maíz debe almacenarse en condiciones

adecuadas para mantener su nivel normal de humedad, evitar problemas debido a las lluvias, a la humedad del suelo y a la putrefacción y, por último, para buscar una protección contra el fuego. La selección del tipo de almacenamiento depende de su ubicación y de las condiciones locales. El resto de maíz puede almacenarse en un almacén abierto, en un almacén con lona, en un almacén con estructura permanente o en un almacén anaeróbico⁴⁴. A la hora de seleccionar el sistema de almacenamiento más adecuado, deben tenerse en cuenta varios factores: la estabilidad de la materia prima durante el almacenamiento, el coste de la infraestructura de almacenamiento, la accesibilidad de la materia prima durante toda la duración del almacenamiento y la integración de la plataforma de

⁴⁰ Monika Fleschhut, Kurt-Jurgen Hulsbergen, Stefan Thurner, Joachim Eder Analysis of different corn stover harvest systems / LANDTECHNIK, 71 (6), 2016. - 252-270 p.

⁴¹ <https://www.becoolproject.eu/2018/10/22/recovering-maize-cob-converting-untapped-biomass-resource-into-valuable-feed-stock/>

⁴² <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=15215>

⁴³ https://www.vermeer.com/NA/en/N/equipment/cob_harvester

⁴⁴ Matt Darr, Ajay Shah, Kevin Peyton, Keith Webster Corn Stover Storage Methods <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>



FIGURA 18:
Almacenamiento al aire libre de pacas de cañote en España.

almacenamiento con una planta de procesamiento. Además, también es importante asegurar el libre acceso de la maquinaria a la biomasa.

El almacenamiento de biomasa en estructuras permanentes ofrece muchas ventajas en comparación con otros sistemas. Sin embargo, debido a la densidad relativamente baja del resto de maíz, incluidas las pacas, y a los elevados costes de capital para la construcción de nuevos almacenes, los almacenes permanentes suelen ser económicamente inviables. Solo se aconsejan este tipo de almacenes permanentes para el almacenamiento del resto de maíz si ya se disponen de estas estructuras.

El almacenamiento al aire libre puede utilizarse para cuando la capa superior de biomasa sirve de cobertura (Fig. 18). También puede utilizarse como almacén principal en algunas regiones, pero es necesario hacerlo

con mucho cuidado debido a las pérdidas de materia seca de la biomasa.

El almacenamiento anaeróbico o ensilado es un método de almacenamiento muy extendido para los piensos húmedos en la industria ganadera. El almacenamiento anaeróbico sigue siendo económicamente viable para las materias primas con alto grado de humedad, especialmente para el almacenamiento en pacas a principios de la temporada o para el almacenamiento de emergencia durante las temporadas de cosecha extremadamente húmedas⁴⁴.

El almacenamiento en lona del cañote de maíz ofrece el equilibrio óptimo entre coste y conservación de la calidad. El material de agrofibra puede utilizarse como material de lona, que proporciona protección contra la lluvia y la nieve. Además, permite la salida de aire a través de ella, lo que evita la formación de hongos y

⁴⁴ Matt Darr, Ajay Shah, Kevin Peyton, Keith Webster *Corn Stover Storage Methods* <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>

moho. La agrofibra ya se utiliza en otras aplicaciones como para el secado de astillas de madera y tiene una vida útil de más de 5 años⁴⁵.

Además, las instalaciones de almacenamiento de pacas de cañote de maíz tienen que estar dispuestas de acuerdo con la normativa de seguridad contra incendios. Por ejemplo, en Ucrania⁴⁶, la superficie de una pila de pacas de paja debe ser inferior a 500 m², y para la paja triturada debe ser inferior a 300 m². Además, se permite disponer las pacas en pilas dobles, pero con una distancia no inferior a 6 m entre pilas y no menos de 30 m entre las pilas adyacentes.

DENSIFICACIÓN DE CAÑOTE DE MAÍZ

Hay que tener en cuenta que la transformación posterior de los subproductos del maíz en briquetas y pellets aumenta el valor añadido de la biomasa. Las briquetas de biomasa son materiales prensados de forma cilíndrica, rectangular o cualquier otra, con un diámetro típico de 60-75 mm y una longitud de 100-400 mm. No hay tamaños estándar para este producto. Las briquetas pueden tener formas muy diferentes, pero en general se pueden distinguir tres tipos: NESTRO, RUF y Pini&Kay (estos tipos se basan en los nombres de las empresas que fabrican las prensas más comunes para la producción de briquetas). El proceso típico de producción de briquetas de biomasa incluye siete etapas: recepción de la materia prima, triturado, calibración, secado, prensado de la materia prima en briquetas (briqueteado), enfriamiento y envasado de las briquetas. La obtención de una briqueta resistente a partir de la masa vegetal triturada está garantizada por las propiedades físicas y mecánicas del material y las condiciones del propio proceso de briqueteado. Para ello, deben alcanzarse ciertos niveles de calidad, que son la densidad de la briqueta (0,8-1,3 t/m³), el contenido de humedad, las dimensiones (diámetro, longitud) y la forma. La densidad es el principal factor que determina la fuerza mecánica y la resistencia al agua de una briqueta. Una ventaja importante de las briquetas como combustible es la temperatura constante durante la combustión durante varias horas. Las briquetas de biomasa pueden quemarse en calderas domésticas y pequeñas calderas para combustibles sólidos con carga manual (hasta 100-150 kW), que a menudo ya están disponibles en los hogares

o en los edificios públicos. En el mercado también hay calderas automatizadas con tolva (hasta 240 kW) diseñadas para briquetas de biomasa. Las briquetas de menor densidad (es decir, más "blandas" debido al prensado de materias primas más húmedas) pueden utilizarse en calderas grandes con alimentación por tornillo. En este caso, debe usarse un tornillo metálico capaz de triturar las briquetas y garantizar su alimentación ininterrumpida en el horno.

Por otro lado, existe la opción de peletizar la biomasa agrícola para aumentar la eficiencia de las operaciones logísticas y ampliar la posibilidad de su uso energético. Los pellets de cañote de maíz se denominan pellets no leñosos, y el proceso de producción es similar al briqueteado de biomasa. Los pellets no leñosos son biocombustibles densificados fabricados a partir de biomasa triturada o molida con o sin aditivos. Tienen una forma de cilindros con diámetro < 25 mm, longitud aleatoria (típicamente de 3,15 a 40 mm), con extremos rotos, obtenidos por compresión mecánica⁴⁷. Las principales características que afectan al proceso de producción son el estado inicial de la biomasa (tamaño de las partículas, volumen inicial, presencia de impurezas, contenido de humedad).

En resumen, para la recolección de restos del cultivo de maíz pueden aplicarse muchas tecnologías basadas en diferentes máquinas. Para la recolección a gran escala, es razonable utilizar maquinaria especial de alta productividad, como trituradoras de tallos, empacadoras, remolques, etc. Pero, para la cosecha a pequeña escala, se puede hacer uso de la maquinaria ya disponible por el agricultor. Además, es importante reducir la contaminación de la biomasa con el suelo y evitar el alto contenido de humedad de los restos recolectados. Por otro lado, los principales elementos de coste del almacenamiento en lona de las pacas de cañote de maíz son los costes de alquiler del terreno, los costes de preparación del suelo, el material de la lona, los costes de carga/descarga, los costes de vigilancia y los costes relacionados con las pérdidas de materia prima debido a la pérdida de materia seca de la biomasa. Finalmente, la transformación del cañote de maíz en briquetas y pellets aumenta la densidad energética de la biomasa, lo que es especialmente importante cuando se transporta la biomasa a largas distancias.

⁴⁵ <http://zavod-kobzarenko.derevo.ua/catalog/details/6019>

⁴⁶ <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0313-07>

⁴⁷ ISO 17225-6:2014 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Graded non-woody pellets

PRODUCCIÓN DE CALOR A PARTIR DE RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

PRODUCCIÓN DE CALOR A PARTIR DE CAÑOTE DE MAÍZ

Los restos de maíz, al igual que otros tipos de subproductos y restos de campo de cultivos, se utilizaban para calefacción en zonas rurales con inviernos fríos, especialmente en los territorios con falta de bosques. Por ejemplo, en los pueblos del sur de la región de Odesa, en Ucrania, los habitantes llevan décadas utilizando una práctica que consiste en alquilar parcelas de maíz a empresas agrícolas o a agricultores. Los lugareños cultivan y cosechan el maíz (antiguamente a mano, hoy en día con maquinaria adecuada, incluidas empacadoras) y recogen los restos de campo del cultivo de maíz y los colocan cerca de sus casas (Fig. 19). En la época fría,

los lugareños utilizan los restos de campo de maíz tanto como forraje como biomasa para la calefacción usando estufas tradicionales, aunque su uso se está reduciendo en los últimos años.

Estos restos triturados son una biomasa difícil de utilizar para la calefacción doméstica a pequeña escala debido a su baja densidad. Por el contrario, la manipulación de grandes pacas también puede ser un problema. Por eso, en este caso, la producción de briquetas y pellets a partir de dicha biomasa puede ser una opción para las calderas modernas. Sin embargo, por ahora, la producción de biocombustibles sólidos a partir de restos de maíz no se ha puesto en marcha en Ucrania y Europa. Sólo hay unos pocos casos de



FIGURA 19: Pacas cuadradas de cañote de maíz en Krynychne (Ucrania).

generadores de calor a partir de pacas de cañote de maíz, que se utilizan tanto para la calefacción como para el secado del grano. La razón principal es el problema de la recolección de la biomasa durante el tiempo de lluvia y la contaminación de esta con la tierra en el momento del corte.

Como se ha mencionado anteriormente, el cañote de maíz puede considerarse una biomasa mejor para la combustión en comparación con la paja de los cereales, pero las características de combustible de la agrobiomasa dependen de muchas condiciones locales y de las prácticas de cosecha. En cualquier caso, las calderas deben de estar adaptadas para quemar estos subproductos del cultivo del maíz. Para ello, puede usarse o una caldera mejorada para la quema de biomasa de madera o una caldera especialmente diseñada. En general, las calderas de paja de cereal pueden considerarse adecuadas para el cañote de maíz, siempre que este tenga un contenido de humedad bajo. También se pueden utilizar soluciones de mixtas con combustión de mezclas de biomasa, por ejemplo, madera con cañote o zuro de maíz.

Existe bibliografía describiendo diferentes ensayos llevados a cabo para la combustión de cañote de maíz. Por ejemplo, los ensayos para la combustión de pequeñas pacas en una caldera de 146 kW con doble cámara diseñada para troncos de madera sin ninguna modificación o los ensayos para la combustión de pacas redondas de cañote de maíz en la caldera de biomasa Farm 2000 alimentada por lotes y con una potencia nominal de salida de 176 kW^{48,49}. Ambas calderas habían mostrado un buen potencial de producción de calor utilizando pacas de cañote de maíz, pero estas calderas necesitaban mejoras para una combustión más eficaz. Así, en la caldera de 146 kW con doble cámara, las pacas de cañote de maíz produjeron una media del 7,5% de cenizas, que incluía aproximadamente un 2% de inquemados, mientras que la madera sólo produjo un 1,7% de cenizas. Las emisiones medias de gases de combustión fueron de 1.324 mg/m³ de CO y 99,1 de NOx en el caso del cañote en comparación con los 118 mg/m³ de CO y 50,6 de NOx en el caso de la madera. Además, la eficiencia global de la

transferencia de calor para el cañote fue inferior a la de la madera (57% frente a 77%). Por otro lado, en la caldera de biomasa alimentada por lotes, las emisiones medias del cañote de maíz fueron de 2.725 mg/m³ de CO, 9,8 mg/m³ de NOx y 2,1 mg/m³ de SO₂, fueron menores a las de la paja de trigo en lo que respecta a los NOx aunque mayores en lo que respecta al CO y al SO₂ (CO 2.210 mg/m³, NOx 40,4 mg/m³ y SO₂ 3,7 mg/m³).

Cabe señalar que ambas calderas utilizaban sistemas de combustión de parrilla fija, que suelen presentar una baja eficiencia y altas emisiones de contaminantes inquemados para la combustión de agrobiomasa con alto contenido de cenizas. Los sistemas de parrilla móvil pueden lograr una mayor velocidad de combustión y eficiencia ya que permiten una mejor mezcla entre el aire y el combustible y facilita la distribución de la agrobiomasa, que se quema más rápidamente⁵⁰.

El interés por el uso de la paja de maíz para aplicaciones de calefacción se encuentra en los territorios que tienen la intención de eliminar gradualmente el carbón para la calefacción y tienen un alto potencial de este recurso. En Grecia, la Empresa Municipal de Calefacción de Distrito de Amyntaio (DETEPA), en Macedonia Occidental, inauguró en otoño de 2020 una nueva planta de red de calor con biomasa (2 x 15 MW) para sustituir el calor suministrado por una central eléctrica de lignito ya clausurada. En su primer año, la planta dependía de la biomasa que podían obtenerse de productores ya establecidos (astillas de madera y pellets de cáscara de girasol), pero DETEPA tiene un gran interés en desarrollar cadenas de suministro de agrobiomasa locales, con el objetivo de adquirir unas 5.000 toneladas de cañote de maíz y podas de viñedos en la temporada de 2021-2022⁵¹. En China existe un enorme potencial de biomasa de restos agrícolas, como es el caso de los restos del cultivo de maíz. La empresa Great Resources ha desarrollado diferentes proyectos para utilizar el cañote de maíz, desde plantas de secado de grano que utilizan briquetas de cañote de maíz hasta plantas multigeneración que producen refrigeración, calor, vapor, electricidad y fertilizantes⁵².

⁴⁸ R.Morissette, P.Savoie, J.Villeneuve *Combustion of Corn Stover Bales in a Small 146-kW Boiler // Energies*, 2011, 4. - 1102-1111 p.

⁴⁹ R.Morissette, P. Savoie, J. Villeneuve. *Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176-kW Boiler Adapted for Round Bales // Energies*, 2013, 6. - 5760-5774 p.

⁵⁰ https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/10/AgroBioHeat_D4.2_agrobiomass-fuels-and-utilization-systems_v1.0.pdf
⁵¹ www.ot.gr/2021/10/05/english-edition/kozani-green-heating-from-corn-and-vine-residues/

⁵² Hong Hao *Unlock the huge potential of agro residue. Presentation. 9.12.2021*

<https://www.worldbioenergy.org/news/574/50/WBA-Webinar-1-Agricultural-residues-to-energy/>

PRODUCCION DE CALOR A PARTIR DEL ZURO DE MAÍZ

A primera vista, las propiedades de combustión del zuro del maíz parecen bastante prometedoras: menor contenido de cenizas y nitrógeno en comparación con muchos otros combustibles basados en agrobiomasa. El principal reto en la combustión de zuro de maíz es el alto contenido de potasio del combustible, que reduce la temperatura de fusión de las cenizas. Esto hace que puedan formarse escorias fundidas en la parrilla del horno, obstruyendo los conductos de aire. Además, los depósitos de ceniza en las superficies son muy aislantes y pueden provocar considerables pérdidas de eficiencia debido a la disminución de la transferencia de calor. Por último, el zuro de maíz suele presentar un alto contenido en cloro que, en combinación con el potasio y otros compuestos, puede dar lugar a la formación de sustancias corrosivas. Los resultados de la combustión de zuro de maíz en reactor a escala de laboratorio y en planta de combustión de biomasa a escala piloto en Austria se describen en el documento²². La densidad energética del zuro de maíz ascendió a 518 kWh/m³ (aproximadamente el 55% de la densidad energética de las astillas de madera con un contenido de humedad comparable). Además, debido al mayor contenido de N del zuro de maíz en comparación con las astillas de madera no tratadas químicamente, se produjo un aumento de las emisiones de NOx. Por otro lado, durante las pruebas a escala piloto, la planta de combustión funcionó entre el 70 y el 85% de su capacidad nominal de caldera (350 kWth). Y se pudo observar la formación de pequeños trozos de escoria en las cenizas de la parrilla, lo que se debió principalmente a la formación de silicatos enriquecidos con K y Na con temperaturas de fusión en el rango de los 1050 °C. En cuanto a las emisiones de gases, se puede afirmar que con unas emisiones medias de CO y COV de 15,6 y 1,3 mg/Nm³ respectivamente (en base a gas de combustión seco, 13 vol% de O₂) se consiguió un muy buen quemado en fase gaseosa. Las emisiones medias de NOx ascendieron a 247 mg/Nm³, pero podría lograrse un potencial de reducción adicional de las emisiones de NOx de aproximadamente un 30% mediante la aplicación optimizada de medidas primarias. Como ya se esperaba a partir de la evaluación de los análisis químicos del combustible húmedo, hubo que reconocer las elevadas emisiones medias de HCl

y SOx, que ascendieron a 34 mg/Nm³ y 30 mg/Nm³ respectivamente. Las emisiones totales de partículas (ETP) (después del multiciclón) estaban claramente dominadas por las emisiones de partículas finas, que ascendían a una media de 91 mg/Nm³. Por consiguiente, especialmente para las aplicaciones de mayor envergadura, será necesaria la instalación de un filtro de mangas o un precipitador electrostático (ESP, por sus siglas en inglés) para el control de las emisiones de partículas finas.

El impacto potencial del alto contenido en potasio del zuro de maíz se demostró en una serie de pruebas realizadas dentro del proyecto AgroBioHeat²². Se probaron dos sistemas de combustión de última generación adecuados para aplicaciones residenciales (caldera de parrilla móvil acoplada con ESP para el control de partículas y caldera con un innovador concepto de escalonamiento extremo de aire), y varios tipos de combustibles de agrobiomasa (hueso de aceituna, pellets de cáscara de girasol, miscanthus, álamo, agropellets y zuro de maíz). EL zuro de maíz presentaba un contenido de potasio especialmente elevado -más del 1 % en peso b.s.-, lo que dio lugar a unas emisiones de partículas excepcionalmente altas en comparación con los demás combustibles de agrobiomasa ensayados, así como a un aumento de la temperatura de los gases de combustión y a las correspondientes pérdidas de eficiencia.

Las peculiaridades de la combustión del zuro de maíz pueden manejarse en aplicaciones de mediana escala, mediante el uso de tecnologías y conocimientos técnicos adecuados. El fabricante francés de calderas Compte-R ha desarrollado varias de estas calderas de zuro de maíz desde 2012. Las características clave de estos sistemas incluyen el uso de parrillas refrigeradas por agua que mantienen las temperaturas por debajo de 850 °C, el diseño y la construcción adecuados de la cámara de combustión y las superficies del intercambiador de calor para reducir la temperatura de los gases de combustión a la entrada de las placas tubulares por debajo de 650 °C, y el uso de sistemas adecuados de limpieza de los gases de combustión para evitar la liberación de partículas finas en la atmósfera⁵³. Estas calderas de zuro de maíz de Compte-R se han instalado en empresas de procesamiento de cereales, pero también en plantas de redes de calor urbana.

⁵³ <https://www.bioenergie-promotion.fr/51630/compte-r-confirme-son-expertise-en-combustion-des-agrocombustibles-solides/>

LA RED DE CALOR URBANA ECO₂WACKEN EN ESTRASBURGO⁵⁴

Desde 2016, varios edificios del distrito de Wacken, en Estrasburgo (Francia), reciben calor de una sala de calderas que cuenta con dos calderas Compté-R, una para madera de 3,2 MW y otra para zuro de maíz de 2 MW. La red Eco2Wacken suministra 30 GWh/año de calor y utiliza anualmente 8.000 t de astillas forestales y 3.000 t de zuro de maíz, con un rendimiento medio del 87%. Los combustibles se entregan en camiones (menos de tres al día) y se descargan en dos zonas distintas. El almacén de madera tiene una capacidad de 300 m³, suficiente

para cuatro días de funcionamiento, mientras que el de zuro es de 180 m³ de silo, lo que garantiza dos días de funcionamiento. Los zuros de maíz se adquieren a una empresa agrícola cercana; sus cenizas de combustión, ricas en potasio, se reciclan de nuevo en las explotaciones agrícolas para su fertilización. Se utilizan filtros de mangas para mantener las emisiones de partículas a niveles muy bajos (por debajo de 10 mg/Nm³). Dos calderas de gas de 6 MW proporcionan apoyo, mientras que un depósito de agua caliente de 95 m³ ofrece posibilidades de almacenamiento térmico. Se calcula que se ahorran más de 7.000 t de CO₂ al año gracias al funcionamiento de este sistema de red de calor urbana

CAÑOTE DE MAÍZ EN PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA Y COGENERACIÓN

Los restos del cultivo de maíz, específicamente el cañote empacado, pueden ser utilizados por las plantas de cogeneración y de energía eléctrica que funcionan con paja. En algunos casos, puede utilizarse como biomasa adicional para la co-combustión con madera. La típica central eléctrica de biomasa utiliza la combustión directa para quemar la biomasa en una caldera y producir vapor a alta presión, que acciona una turbina y produce electricidad. Por otro lado, una central de cogeneración capta además el calor producido y proporciona así calor y electricidad.

DP CleanTech ha desarrollado muchos proyectos de centrales eléctricas que utilizan restos de campo del cultivo de maíz como combustible. La empresa inauguró en 2007 la central eléctrica de paja Liaoyuan, con una capacidad de 30 MWe, en la provincia china de Jilin. Funciona con combustibles de origen local procedentes principalmente de restos agrícolas de campo como el cañote de maíz. La caldera está diseñada para manejar combustibles como las astillas de madera, que pueden alimentarse a través de un silo auxiliar aportando hasta un 35% del total del combustible. La planta consume más de 160.000 toneladas de paja al año con una disponibilidad de 7800 h/año. La calde-

ra de vapor alimentada con paja funciona con condiciones de vapor a 92 bar y 540 °C, lo que da lugar a un rendimiento global neto de la planta superior al 32% y a un rendimiento de la caldera superior al 93%. La paja se conduce a la caldera a través de una cinta con esparcidor y luego se quema en una parrilla vibratoria refrigerada por agua en condiciones controladas⁵⁵.

Otro ejemplo es la central de biomasa de 15 MWe de Miajadas, en España (Fig. 20, 21), que está en servicio desde 2010 y consume 110.000 toneladas de biomasa herbácea (paja de cereales, cañote de maíz) y de madera (astilla forestal, restos forestales y restos de poda agrícola) al año. Se desarrolló como un proyecto de I+D junto con empresas y centros tecnológicos de España, Finlandia y Dinamarca, con el apoyo del 7º Programa Marco de la Unión Europea, siendo el operador Acciona Energía. La producción media anual de la planta es de 128 GWh, equivalente a la demanda eléctrica de 40.000 hogares y se considera que se evita la emisión de 123.000 toneladas de CO₂ al año⁵⁶. La central utiliza una caldera de vapor con parrilla vibratoria y capacidad de vapor de 71 t/h, ciclo Rankine sin regeneración y un sistema de doble alimentación de pacas y astillas de madera⁵⁷.

⁵⁴ <https://www.bioenergie-promotion.fr/51570/bois-rafle-de-mais-pour-la-chaufferie-eco2wacken-de-strasbourg/>

⁵⁵ <https://www.dpcleantech.com/waste-and-biomass-clean-energy-technologies/combustion-technology/dp-wcv-grate/download/994/30/22>

⁵⁶ https://www.acciona.com/projects/miajadas-biomass-plant/?_adin=01010174103

⁵⁷ http://ghesa.com/en/portfolio_page/miajadas/



FIGURA 20:
Planta de biomasa de 15MW en Miajadas (España).



FIGURA 21:
Pacas de cañote de maíz en el almacén de biomasa de la central de Miajadas (España)⁵⁸.

También está como ejemplo la fábrica de papel Bulleh Shah Packaging Limited en Pakistán donde la empresa danesa Babcock & Wilcox Vølund ha construido una planta de energía por biomasa⁵⁹. La planta puede utilizar diferentes biomásas de restos agrícolas (paja de trigo, tallos de maíz, tallos de arroz, tallos de algodón y otros) de los agricultores locales para producir vapor con un caudal de 150 t/h y una capacidad nominal de combustible de 37,7 t/h. La caldera cuenta con la parrilla vibratoria refrigerada por agua para una combustión eficaz de la biomasa. Las cenizas producidas por esta caldera se ofrecen gratuitamente, y pueden utilizarse como abono para los cultivos, en el proceso

de fabricación de ladrillos o como alternativa a la arena en la colocación de baldosas para el suelo⁶⁰.

Se puede encontrar más información sobre las centrales térmicas de paja en la guía de AgroBioHeat "Uso de paja para producción de energía. Tecnologías, política y la innovación en Dinamarca. Segunda edición". (https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/Straw-to-Energy_AgroBioHeat_Spanish_web.pdf)

⁵⁸ https://www.acciona-energia.com/es/areas-de-actividad/?_adin=0744759730

⁵⁹ <https://www.babcock.com/-/media/documents/case-profiles/renewables/pch201-130-packages.ashx?la=ru-ru&hash=F11E957E430907C7A937EE06E6AA6FAA852EB0A2>

⁶⁰ <https://www.packages.com.pk/wp-content/uploads/2020/09/Packages-Group-Sustainability-Report-2019.pdf>

RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ PARA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

El maíz en grano desempeña un papel crucial como materia prima para la producción de etanol. Según los informes de la asociación europea de etanol renovable (ePURE), la industria europea del etanol renovable sigue creciendo. La capacidad de producción instalada (UE + Reino Unido) en 2020 fue de 9.992 millones de litros, lo que supone un ligero aumento con respecto a 2019 donde fue de 9.893 millones de litros. Además, los miembros de ePURE utilizaron 6,67 millones de toneladas de maíz para ese fin en 2020, lo que supuso el 49,5% del volumen total de bioetanol producido. Esto se tradujo en un aumento con respecto al 2019, donde se utilizaron 6,56 millones de toneladas lo que supone el 48,6% del bioetanol producido, demostrando la importancia del maíz en la producción de bioetanol de primera generación en la UE⁶¹.

Por otro lado, se espera que el cañote en forma de pacas pueda ser una importante materia prima para la obtención de bioetanol de segunda generación, biocombustible avanzado producido a partir de biomasa lignocelulósica. Y esto es muy importante ya que se espera que la contribución de los biocombustibles avanzados y del biogás producidos a partir de las ma-

terias primas enumeradas en la parte A del anexo IX de la Directiva RED II sea al menos el 0,2 % en 2022, el 1 % en 2025 y el 3,5 % en 2030 del consumo final de energía en el sector del transporte.

Para la producción de bioetanol a partir de paja o cañote de maíz se requiere de una etapa de pretratamiento que permita destruir la estructura lignocelulósica, facilitando el acceso de las enzimas a las cadenas de celulosa. En la Fig. 22 se muestra un esquema típico de producción de bioetanol a partir de materia prima lignocelulósica. A partir de una tonelada seca de cañote de maíz, el rendimiento teórico de producción de bioetanol es de 428 litros. Sin embargo, según los datos de la planta de producción de bioetanol celulósico de DuPont Nevada Site, solo se ha conseguido producir 283,5 l de bioetanol a partir de 1 t de cañote de maíz (Fig. 15). Pero hay que tener en cuenta que el grano de maíz cosechado podría servir también para la producción de bioetanol de primera generación. Por lo tanto, en total se estima que se pueden obtener 140,8 GJ por la combustión de los restos y el biocombustible obtenidos de una hectárea de maíz⁶².

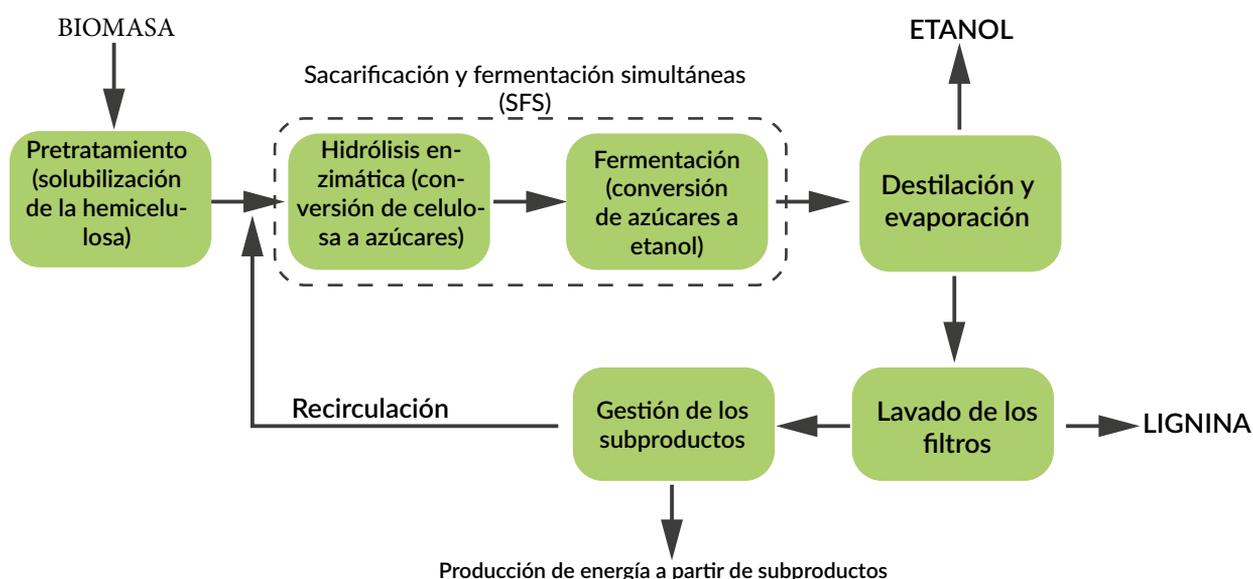


FIGURA 22: Proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica⁶³.

⁶¹ <https://www.epure.org/wp-content/uploads/2021/09/210823-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2020-web.pdf>

⁶² *Second-Generation Biofuel Markets: State of Play, Trade and Developing Country Perspectives. United Nations conference on trade and development - 69 p.*

⁶³ M. N. A. M. Yusoff, N. W. M. Zulkifli, B. M. Masum and H. H. Masjuki *Feasibility of bioethanol and biobutanol as transportation fuel in spark-ignition engine: a review. RSC Adv., 2015, 5, 100184-100211.*

Sólo un pequeño número de instalaciones de producción de etanol a partir de materiales celulósicos estaban operando con éxito en todo el mundo a finales de 2020⁶⁴, destacando EE. UU. y Brasil que ya cuentan con plantas de producción de bioetanol lignocelulósico⁶⁵. Además, también se han puesto en marcha algunas instalaciones de bioetanol de segunda generación en la UE y China, siendo algunas de ellas capaces de producir bioetanol a partir de restos del cultivo de maíz.

Así, en EE. UU., en el año 2020 la capacidad total instalada de producción de bioetanol era de 66.000 millones de litros al año, de los cuales se produjeron 52.239 millones de litros⁶⁶. De esta capacidad, el 4,1% utilizaba biomasa celulósica como materia prima, y un 0,4% operaba sólo con biomasa celulósica de cañote de maíz. Las instalaciones más grandes actualmente son VERBIO North America Corp en Nevada con una capacidad de producción de 113,5 millones de litros al año (30 mgy⁶⁷) que fue comprada a DuPont, Project LIBERTY en Emmetsburg con 75,7 millones de litros al año (20 mgy) y Seaboard Energy Kansas en Hugoton con 94,6 millones de litros al año (25 mgy).

En Brasil, el bagazo es la principal materia prima del bioetanol celulósico, utilizándose en torno a 178 mil toneladas de esta biomasa que permitió producir unos 32 millones de litros en 2020⁶⁸ aunque la producción puede ser mucho mayor cuando las plantas alcancen su plena capacidad. En China, desde 2012 funciona la instalación de etanol celulósico de Longlive Bio-technology Co. Ltd con una capacidad de 60.000 toneladas al año en Shandong⁶⁹.

Con respecto a la UE, la producción de etanol celulósico fue de 25 millones en 2020⁷⁰. Una de las mayores instalaciones de producción de etanol celulósico del mundo, la planta de Beta Renewables, se inauguró oficialmente en Crescentino (Italia) en 2013, pero se cerró

en 2017 debido a una reestructuración de la empresa química matriz Mossi & Ghisolfi. La planta tenía una capacidad anual de 40 kt de etanol producido a partir de paja de trigo, paja de arroz y caña común (*Arundo donax*)⁷¹. La planta fue adquirida por la filial química de Eni, Versalis, en noviembre de 2018 y puesta de nuevo en marcha a principios de 2022.

El proyecto COMETHA, apoyado por el Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea de 2014 a 2018, implicó la construcción y puesta en marcha de una instalación pre-industrial para la producción de 80.000 t/año de bioetanol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica en Porto Marghera (Italia)⁷². El proyecto abordaba el desarrollo de la cadena de suministro de biomasa sostenible a partir de 360.000 toneladas anuales de biomasa lignocelulósica procedente de la región del Véneto, como caña común (*Arundo donax*) y restos agrícolas, sobre todo cañote de maíz ya que es la materia prima más adecuada para la producción de bioetanol en la zona.

En 2021, la empresa suiza Clariant puso en marcha la primera planta de producción de etanol celulósico a escala comercial de Europa en el suroeste de Rumanía, haciendo uso de una solución innovadora denominada Sunliquid®. Esta planta crea valor mediante la conversión de los restos agrícolas, por ejemplo, paja de cereales, cañote de maíz, paja de arroz o bagazo de caña de azúcar, en etanol celulósico y es capaz de producir 50.000 toneladas de este mediante la conversión de 250.000 toneladas de paja de trigo de origen local. Además, la construcción de la planta en una zona predominantemente rural ha creado de forma permanente más de 400 empleos: 100 de ellos en la propia planta y 300 en zonas adyacentes, por ejemplo, en la cadena de suministro de materias primas. Además, hay proyectos de etanol celulósico en marcha en otros tres países europeos -Eslovaquia, Polonia y Bulgaria- con la tecnología de Clariant⁷³.

⁶⁴ *Renewables 2021 Global Status Report*. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

⁶⁵ *Technical options for retrofitting industries with bioenergy*. *BioFitHandbook* <https://www.biofit-h2020.eu/publications-reports/BioFitHandbook-2020-03-18.pdf>

⁶⁶ *Essential energy*. 2021. *Ethanol industry outlook*. *Renewable fuels association report*. https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2021/02/RFA_Outlook_2021_fin_low.pdf

⁶⁷ Million gallons per year

⁶⁸ *Biofuels Annual*. Brazil. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_08-03-2020

⁶⁹ <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/advanced-technologies/sugar-to-alcohols>

⁷⁰ *Biofuels Annual*. European Union. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_06-29-2020

⁷¹ Monica Padella, Adrian O'Connell, Matteo Prussi. *What is still Limiting the Deployment of Cellulosic Ethanol? Analysis of the Current Status of the Sector*. *Appl. Sci.* 2019, 9, 4523; doi:10.3390/app9214523

⁷² <https://cordis.europa.eu/project/id/322406>

⁷³ <https://www.euractiv.com/section/alternative-renewable-fuels/opinion/making-european-sustainable-mobility-a-reality-with-cellulosic-ethanol/>

RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El ensilado de grano maíz es uno de los sustratos más populares utilizados para alimentar las plantas de biogás agrícolas. Sin embargo, debido al aumento de los precios del ensilaje de maíz, muchos operadores de plantas de biogás empezaron a buscar sustratos alternativos fáciles de conseguir, baratos y con una buena productividad de metano⁷⁴. Los restos del cultivo de maíz pueden ser uno de estos sustratos.

Una de las ventajas del uso de restos como el cañote de maíz para la digestión anaeróbica es que el proceso no se ve afectado por su alto contenido de humedad, aspecto que si puede ser problemático para los

procesos de combustión directa. Además, el sustrato fermentado puede aplicarse como biofertilizante y de esta manera recircular los nutrientes al campo de cultivo, incluyendo una parte del carbono.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en comparación con el ensilado de maíz, la digestión anaeróbica de los restos de campo de maíz tiene un menor potencial de biogás (tabla 3). Además, requiere de un mayor tiempo de retención en comparación con el ensilado de maíz, aunque se considera que esta diferencia podría ser asumida por los operadores de las plantas de biogás.

TABLA 3:

Producción de metano a partir de restos de campo del cultivo de maíz⁷⁵ y ensilado de maíz⁷⁶.

	MS, % de materia seca	Biogás, I _N /kg SV	CH ₄ , I _N /kg SV	MS degradada, %
1. 1. Fracciones de la planta de maíz				
• Tallos	25.5 ± 0.8	424.3	233.8	53.9
• Hojas	63.3 ± 0.8	442.9	244.5	57.0
• Envolturas	58.2 ± 0.6	544.4	307.0	70.4
• Zuro	43.5 ± 0.2	379.8	206.6	51.3
2. 2. Ensilado de maíz	27.7	673	345	77.9

MS – materia seca; SV – sólidos volátiles

⁷⁴ Mazurkiewicz, J.; Marczuk, A.; Pochwatka, P.; Kujawa, S. Maize Straw as a Valuable Energetic Material for Biogas Plant Feeding. *Materials* 2019, 12, 3848. <https://doi.org/10.3390/ma12233848>

⁷⁵ Simona Menardo, Gianfranco Airoidi, Vincenzo Cacciatore, Paolo Balsari Potential biogas and methane yield of maize stover fractions and evaluation of some possible stover harvest chains, *Biosystems Engineering*, Volume 129, 2015, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.010>.

⁷⁶ Bauer, A., Leonhartsberger, C., Bösch, P., Amon, B., Friedl, A., & Amon, T. (2009). Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(2), 153–161. doi:10.1007/s10098-009-0236-1.

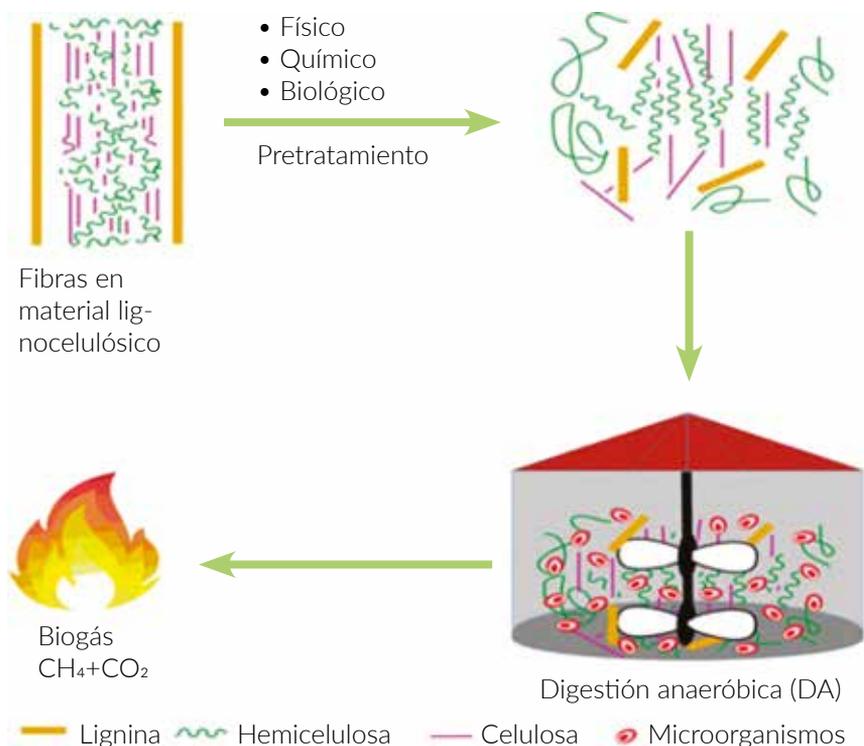


FIGURA 23:

Diagrama esquemático del pretratamiento del material lignocelulósico para la producción de biogás⁸⁰.

Debido al alto contenido de compuestos lignocelulósicos en las diferentes fracciones de la planta de maíz (Tabla 2), es necesario someterlos a un tratamiento previo de destrucción mecánica, física, biológica o química antes de la fermentación (Fig. 23). Estos procesos mejoran el rendimiento de biogás y disminuyen el tiempo de retención del sustrato en un digestor anaeróbico, aunque requieren energía y costes adicionales. Desde el punto de vista energético, sólo el pretratamiento químico parece ser sostenible⁷⁷. El análisis de siete pretratamientos químicos distintos sobre paja de maíz mostró que tanto el tratamiento con un 3% de H₂O₂ como el que empleó un 8% de Ca(OH)₂ obtuvieron los

mayores rendimientos de producción de metano con 216,7 y 206,6 ml CH₄/g sólidos volátiles, respectivamente, lo que supone rendimientos un 115,4% y un 105,3% superiores a los de la paja no tratada, respectivamente⁷⁸. Estos dos procesos son más beneficiosos económicamente además de ser más eficaces en comparación con otros pretratamientos comparados. También es prometedor el pretratamiento biológico, ya que los restos de la planta de maíz pretratados con microorganismos complejos produjeron un 131,6% más de metano total que el control no tratado, aunque su rendimiento económico es mucho menor⁷⁹.

⁷⁷ Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016). Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 34(8), 1289–1304. doi:10.1016/j.biotechadv.2016.09.004

⁷⁸ Song Z, GaiheYang, Liu X, Yan Z, Yuan Y, et al. (2014) Comparison of Seven Chemical Pretreatments of Corn Straw for Improving Methane Yield by Anaerobic Digestion. *PLoS ONE* 9(4): e93801. doi:10.1371/journal.pone.0093801

⁷⁹ Panpan Li, Chao He, Gang Li, Pan Ding, Mingming Lan, Zan Gao & Youzhou Jiao (2020) Biological pretreatment of corn straw for enhancing degradation efficiency and biogas production, *Bioengineered*, 11:1, 251-260, DOI: 10.1080/21655979.2020.1733733

⁸⁰ Amin, F.R., Khalid, H., Zhang, H. et al. Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Expr* 7, 72 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>

En 2013, se puso en marcha una planta piloto de monodigestión (sin mezclar con otros sustratos) de restos de campo de la planta de maíz con una capacidad eléctrica de 50 kW en Renqiu (China)⁸¹. Esta planta de biogás consta de una etapa de pretratamiento mediante hidrólisis con 2 digestores de 476 m³ con alimentación continua de 40 m³.

En diciembre de 2019, la empresa española AB Energy SPA puso en marcha en Milán (Italia) una planta de producción de biometano con un caudal de 606 Nm³/h y que permite emplear materias primas agrícolas, incluidos los tallos de la planta de maíz, permitiendo de esta manera alimentar la red de gas italiana⁸².

Y las iniciativas de empleo de tecnologías de biogás industrial para utilizar restos del cultivo de maíz y otros restos de cultivos como materia prima siguen creciendo. Un nuevo proyecto de EnviTec Biogas (Alemania) construirá cerca de la ciudad de Qin Xian, en la provincia china de Shaanxi, una planta de biogás con cuatro digestores que generarán unos 37.000 Nm³ diarios de

biogás a partir de restos agrícolas como los tallos de maíz⁸³. En esta planta se empleará un procedimiento de mejora del gas mediante el empleo de membranas en tres etapas, patentado por Evonik, permitiendo refinar el biogás hasta convertirlo en biometano y reduciendo a niveles bajos la pérdida de metano durante el proceso⁸⁴.

También en la región ucraniana de Khmelnytsky, la empresa Teofipol Energy está construyendo una planta de biogás con una capacidad eléctrica de 10,5 MW, que utilizará los restos de campo de cultivos, entre ellos un gran volumen de restos del cultivo de maíz.

Y Verbio (Alemania) ha anunciado la instalación de un digestor anaeróbico en la antigua planta de etanol celulósico de DuPont en Nevada (EE. UU.), que utilizará 100.000 toneladas anuales de cañote de maíz para producir biometano con el equivalente energético de 80 millones de litros de gasolina⁸⁵.

⁸¹ Bionova Biogas GmbH. *Map with references Semi-aerobic Hydrolysis Facilities in Germany and around the world* https://bionova-biogas.de/en/pdf/2014_References_Bionova.pdf

⁸² *Biogas success stories 2020*. European Biogas Association. https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/11/EBA_catalogue2020_WEB-1.pdf

⁸³ *Biogas barometer 2020*. EurObserv'ER <https://www.eurobserv-er.org/pdf/biogas-barometer-2020/>

⁸⁴ <https://www.bioenergy-news.com/news/construction-underway-on-two-envitec-biogas-projects-in-china/>

⁸⁵ *Renewables 2021 Global Status Report*. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD EN LA UTILIZACIÓN DE LOS RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

ELIMINACIÓN SOSTENIBLE DE LOS RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

Indiscriminate harvesting of crop residues can induce La recolección indiscriminada de los restos de campo tras la cosecha del maíz puede tener efectos negativos sobre las dinámicas del suelo, el crecimiento de las plantas y otros factores del ecosistema agrícola⁸⁶. La reducción de la entrada de sustrato orgánico en el suelo implica una reducción directa de las existencias de C, lo que afecta negativamente al microbiota del suelo. Sin embargo, los efectos de la gestión de los restos de campo en la emisión de GEI del suelo aún no se conocen del todo y exigen más estudios. En general, la recolección de estos restos de campo reduce las emisiones de CO₂ y N₂O producidas por la descomposición y no tiene efectos sobre la emisión de CH₄. Sin embargo, el agotamiento gradual de las reservas de C y N en el suelo, asociado al uso de fertilizantes minerales, podría inducir un balance negativo de C y mayores emisiones de N₂O en las zonas donde se recolectan estos restos de manera continuada. Por eso, la respuesta de las plantas de producción de bioenergía a la gestión de estos restos de los cultivos es específica para cada lugar, y se centra en distintas prácticas agrícolas (laboreo de conservación, rotación

de cultivos, cultivos de cobertura, insumos orgánicos, etc.).

Del mismo modo, la estrategia de recolección de restos del cultivo de maíz depende de las condiciones locales. En la Fig. 24 se muestra una ilustración conceptual de cómo los factores económicos deben equilibrarse con los factores basados en la protección del suelo y del ecosistema.

Para ayudar a los agricultores a tomar una decisión racional, el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del USDA elaboró las directrices para la cosecha de restos de campo del cultivo de maíz en un esfuerzo por prevenir la degradación del suelo resultante de la una excesiva retirada de los mismos⁸⁸. Según el documento, las tasas sostenibles de eliminación de estos restos de campo para la producción de biocombustibles varían en función de factores como la gestión, el rendimiento y el tipo de suelo. Herramientas como RUSLE, WEQ y el Índice de Acondicionamiento del Suelo son probablemente las formas más prácticas de predecir las tasas de retirada de restos de campo más seguras.

Las tasas de recolección (o de eliminación) no son lo mismo que el porcentaje de cobertura del suelo: es necesar-

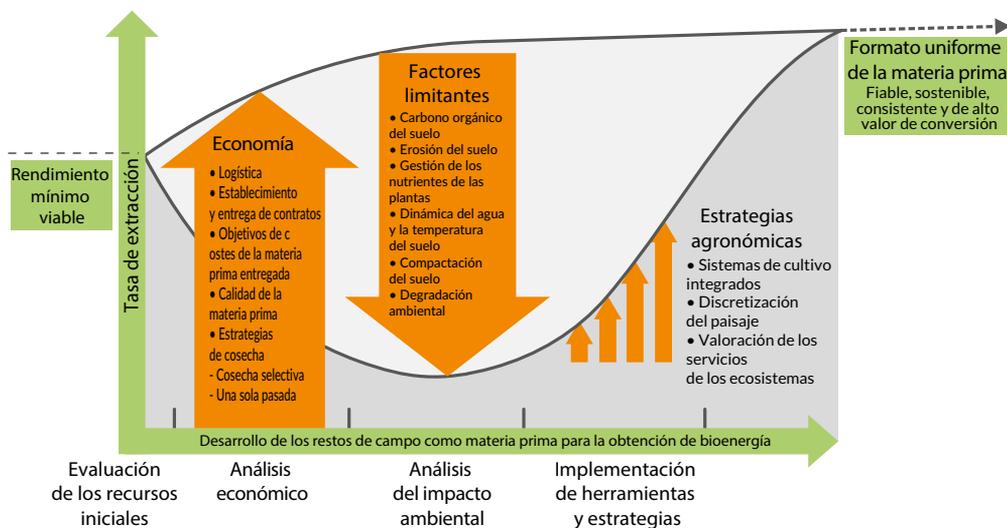


FIGURA 24:

Dependencia de la tasa de eliminación de restos de campo del cultivo de maíz con respecto a factores económicos y agronómicos⁸⁷. Las barras de la derecha ilustran diversas prácticas de gestión del suelo y de los cultivos que pueden aplicarse para ayudar a garantizar el desarrollo y la disponibilidad de suministro de materias primas sostenibles.

⁸⁶ Cherubin Mauricio et al. (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola*, v.75, n.3, 55-272. 75. doi:10.1590/1678-992X-2016-0459

⁸⁷ <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2442&context=usdaarsfacpub>

⁸⁸ Susan S. Andrews. White paper. Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations // USDA-Natural Resource Conservation Service - February 22, 2006.

ia una conversión adecuada y variará según el cultivo y la región. Mientras que las zonas con bajas pendientes y altos rendimientos pueden soportar la recogida de restos del cultivo, en muchas otras zonas las cantidades necesarias para mantener la calidad del suelo serán superiores a las prácticas actuales de cobertura del suelo. Por eso, algunas empresas ofrecen la eliminación sostenible de los restos de campo. Por ejemplo, Pacific Ag⁸⁹ determina con cada agricultor, campo por campo, la cantidad correcta de restos a recolectar para garantizar que se satisfagan las necesidades de humedad y protección del suelo, al tiempo que se optimiza la eficacia del laboreo, los insumos y la nascencia.

EMISIONES DE GEI PROCEDENTES DE LA LOGÍSTICA DE LOS RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

El uso energético de los restos de campo del maíz debe cumplir los criterios de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de la RED II además de los criterios de sostenibilidad no relacionados con los gases de efecto invernadero (por ejemplo, la calidad del suelo, la biodiversidad o las reservas de carbono del suelo) cuando se utilicen en grandes plantas (≥ 20 MW). La evaluación sostenible de la cadena de suministro de centrales de ciclo combinado de calor y electricidad con cañote de maíz en Rumanía se presenta en el informe del proyecto europeo de investigación Smart CHP⁹⁰. Esta cadena de suministro se evalúa en función de los valores totales de emisión para el suministro de biomasa, el proceso de producción de bioaceites de pirólisis rápida (FPBO – Fast Pyrolysis Bio-Oil) y el transporte de FPBO desde la ubicación de la planta hasta el usuario final. En el proceso no sólo se produce aceite de pirólisis, sino también vapor y electricidad como coproductos. Los resultados muestran que los valores de reducción de emisiones GEI de la cadena de suministro de Smart CHP de restos de

campo del cultivo de maíz son del 95% para la electricidad y del 96% para el calor en el caso de suponer una distancia máxima de transporte de FPBO de 50 km mientras que son del 94% y 96%, respectivamente, para distancias de hasta 150 km. En total, las emisiones de GEI del suministro de los restos de campo del maíz son estimadas en 2,0 gCO₂-eq/MJ de biomasa, de la que la emisión asociada al proceso de recolección en campo supone 0,88 gCO₂-eq/MJ de biomasa.

En Estados Unidos, la producción de electricidad y de combustible a partir del empleo de restos del cultivo de maíz, reduce las emisiones de GEI entre un 21 y un 92% en comparación con sus homólogos convencionales. Y el beneficio medioambiental es todavía mayor en el caso de la producción combinada de calor y electricidad si lo comparamos con la red gas natural (1,4 tCO₂e por t de restos de cultivo de maíz)⁹¹, que se muestra en la Fig. 25. Con respecto a otro estudio en la provincia china de Jilin 92, se observó que la utilización de pellets de estos restos de campo permitía eliminar el 90,46% de las emisiones de GEI del ciclo de vida con respecto a la quema de carbón. Sin embargo, existen diferentes temores asociados al uso de estos restos de campo, similares a los de otros tipos de restos de cultivos, por lo que su uso sigue sin estar extendido.

Así, la producción de energía a partir de los restos del cultivo de maíz produce emisiones de GEI relativamente pequeñas, que pueden calcularse utilizando la metodología de cálculo de reducción de emisiones aprobada para una cadena de valor específica. En el caso de la biomasa sólida, sólo las instalaciones que produzcan electricidad, calor renovable y refrigeración o combustibles con una potencia térmica nominal total igual o superior a 20 MW deberán cumplir los criterios de sostenibilidad y ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero según la Directiva Europea de Energías Renovables (RED II).

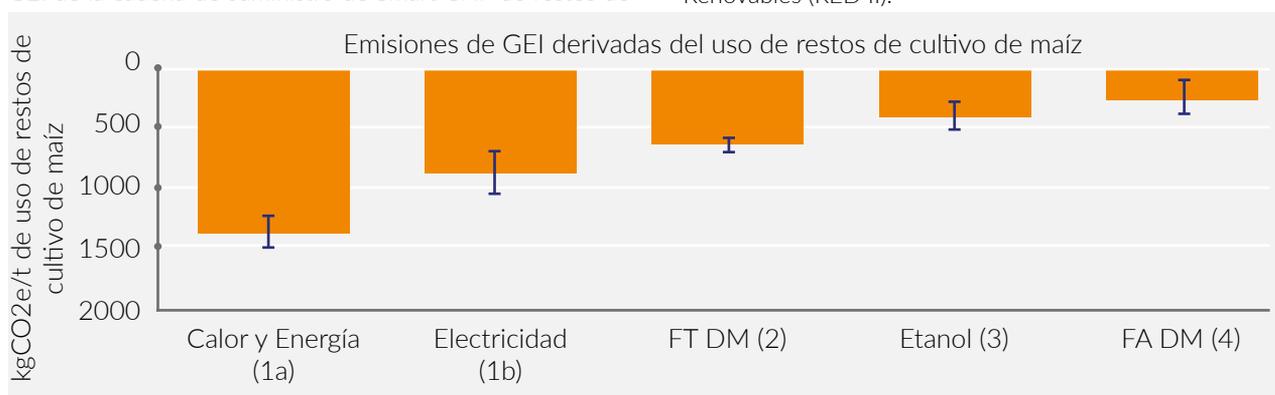


FIGURA 25:

Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero por el uso alternativo de los restos de campo del cultivo de maíz en la red eléctrica estadounidense, donde:

FT es Fischer-Tropsch; DM es destilado medio; FA es fermentación avanzada⁹².

⁸⁹ <https://pacificag.com/harvesting/>

⁹⁰ D5.1 SUSTAINABILITY ASSESSMENT_ BTG_ JUNE 2020 https://www.smartchp.eu/?jet_download=1799

⁹¹ Trivedi, P., Malina, R., & Barrett, S. R. H. (2015). Environmental and economic tradeoffs of using corn stover for liquid fuels and power production. *Energy & Environmental Science*, 8(5), 1428–1437. doi:10.1039/c5ee00153f

⁹² Shizhong Song, Pei Liu, Jing Xu, Chinhao Chong, Xianzheng Huang, Linwei Ma, Zheng Li, Weidou Ni, Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province, *Energy* (2017), doi: 10.1016/j.energy.2017.04.068

ANEXO 1: PRINCIPALES TIPOS DE MAQUINARIA PARA LA RECOLECCIÓN, LA LOGÍSTICA Y LA TRANSFORMACIÓN EN PELLETS/BRIQUETAS DE LOS RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

Puede encontrar más información de los fabricantes y distribuidores de maquinaria en la tabla accesible en el siguiente enlace:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1o-u1S0B5IXwjQW72b7C_G5kNAwmxE6-l6VcyEd6myog/edit#gid=0

Logo	Contacto	Descripción	Trituración/ hilerado	Empacado	Recogida/ carga	Transporte	Peletización/ Briquetado
	BioG GmbH Weilbolden 18, 4972 Utzenaich Austria +43 (0) 7751/50149-0 office@biog.at https://biog.at	El BioChipper desarrollado por BioG, un concepto de triturado con consolidación de hileras, permite la recolección de restos de campo como los del cultivo de maíz, paja de colza, paja de cereales, cultivos intermedios y restos de trabajos ambientales y de mantenimiento. Las operaciones de aspiración, picado e hilerado se realizan en un solo paso.	●				
	HINIKER COMPANY 58766 240th Street Mankato, MN 56002 USA (507)-625-6621 (800)-433-5620 https://www.hiniker.com	Una hileradora de mayales Hiniker Serie 5600 puede reducir sustancialmente el tiempo al triturar e hilar los tallos en una sola pasada.	●				
	LOFTNESS COMPANY 650 South Main Street PO Box 337 Hector, MN 55342 USA 320-848-6266 info@loftness.com https://www.loftness.com	La trituradora de hilerado es el último ejemplo de cómo Loftness convierte un reto en una oportunidad. El mercado energético tan impredecible y la demanda de la biomasa están convirtiendo los restos de campo de las cosechas en una fuente de beneficios.	●				
	CLAAS https://www.claas-group.com/	Claas es productor mundial de cosechadoras autopropulsadas de forraje. Claas es también una de las principales ingenierías agrícolas a nivel mundial de tractores y empacadoras.		●	●		

Logo	Contact	Description	Trituración/ hilerado	Empacado	Recogida/ carga	Transporte	Peletización/ Briquetado
	<p>Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH & Co. KG Zentrale: Heinrich-Krone-Straße 10 D-48480 Spelle Tel.: +49 (0)5977/935-0 Fax: +49 (0)5977-935-339 Info.ldm@krone.de https://landmaschinen.krone.de/</p>	<p>Como especialista en forraje, KRONE fabrica segadoras de discos, henificadores, rastrillos, vagones de forraje y remolques de ensilado, empacadoras redondas y cuadradas, así como las segadoras acondicionadoras de alta capacidad y autopropulsadas BiG M y las cosechadoras de forraje BiG X.</p>		●	●	●	
	<p>Kuhn Group KUHNSAS 4 Impasse des Fabriques BP 50060 F-67706 Saverne CEDEX +33(0)3 88 01 81 00 Fax: +33(0)3 88 01 81 01 https://www.kuhn.com/</p>	<p>El Grupo Kuhn es el productor mundial de maquinaria para la recolección de heno y forraje. Kuhn produce trituradoras, rastrillos y empacadoras.</p>	●	●			
	<p>AGCO Corporation https://www.agcocorp.com</p>	<p>A través de marcas conocidas como Challenger®, Fendt®, GSI®, Massey Ferguson® y Valtra®, AGCO Corporation ofrece soluciones agrícolas a agricultores de todo el mundo a través de una línea completa de tractores, cosechadoras, equipos para heno y forraje, equipos de siembra y labranza, almacenamiento de grano y sistemas de producción de proteínas. Las soluciones de heno y forraje de AGCO van desde segadoras y empacadoras, sopladores de forraje y cajas de almacenamiento, todas ellas con innovaciones en tamaño, capacidad y eficiencia.</p>		●	●		
	<p>CNH Industrial https://www.cnhindustrial.com/</p>	<p>CNH Industrial produce y vende equipos agrícolas y de construcción, camiones y vehículos comerciales. Las marcas de la empresa que presentan maquinaria para la recolección de restos agrícolas y la logística son New Holland, Case e Iveco.</p>	●	●	●	●	
	<p>John Deere https://www.deere.com</p>	<p>Desde su fundación en 1837, John Deere ha suministrado productos y servicios para apoyar a quienes están vinculados a la tierra. John Deere produce una amplia gama de maquinaria para la recolección de biomasa, incluyendo empacadoras y remolques.</p>	●	●	●		

Logo	Contacto	Descripción	Trituración/ hilerado	Empacado	Recogida/ carga	Transporte	Peletización/ Briquetado
	Arcusin S.A. Polígono Industrial Pla d'Urgell - Av. Merlet, 8 - 25245 VILA-SANA Lleida (Spain) T 973 71 28 55 - 696 98 29 10 arcusin@arcusin.com https://www.arcusin.com	La empresa produce maquinaria para el sector de la manipulación de pacas como el cargador automático de pacas AutoStack FSX y XP54 y el acumulador de pacas ForStack 8.12			●		
	ZAVOD KOBZARENKO LTD Ukraine, 42500, Sumy region., Lypova Dolyna, Rusaniwska street, 17 +38 (044) 451-68-77, +38 (095) 277-63-98 www.kobzarenko.com.ua	Producción de equipos para la recogida y transporte de pacas. - Remolque para pacas cuadradas PT-16 KVADRO; - remolques autocargadores para pacas redondas; - remolques de plataforma.			●	●	
	ProAG 2131 Airport Drive Saskatoon, SK Canada S7L 7E1 306-933-8585 https://www.proagdesigns.com/	Las máquinas portadoras de pacas ProAG están diseñadas para recogida y apilado tanto de pacas redondas como cuadradas de gran tamaño.			●		
	URSUS S.A. DOBRE MIASTO - HQ ul. Fabryczna 21, 11-040 Dobre Miasto Poland +48 22 506 56 00 dobremiasto@ursus.com https://www.ursus.com/	URSUS es sin duda la más antigua marca polaca de vehículos y maquinaria fabricados para las necesidades de la agricultura, entre los que se encuentran las empacadoras (incluidas las destinadas al ensilado de heno) y las plataformas para el transporte de pacas.		●		●	
	AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG Dieselstrasse 5-9 21465 Reinbek Hamburg, Germany +49 (0) 40 72 77 10 info@akahl.de https://akahl.de	La granulación de materias primas renovables para la recuperación de energía ha sido un aspecto importante para KAHL. Por eso las plantas de peletización de paja y forraje seco han formado parte del programa de suministro de KAHL.					●

Logo	Contacto	Descripción	Trituración/ hilerado	Empacado	Recogida/ carga	Transporte	Pelletización/ Briquetado
	<p>CPM Europe B.V. Rijder 2, 1507 DN Zaandam The Netherlands +31 75 65 12 611 info@cpmeurope.nl https://www.cpmeurope.nl/</p>	<p>CPM Europe produce equipos de alta gama para el granulado y la molienda de una gran variedad de maderas y productos agrícolas.</p>					●
	<p>ANDRITZ Feed and Biofuel A/S Esbjerg, Denmark Phone: +45 72 160 300 andritz-fb.dk@andritz.com https://www.andritz.com</p>	<p>ANDRITZ puede diseñar, fabricar, suministrar y optimizar la maquinaria para producir pellets de biomasa de alta calidad. Las soluciones están siempre respaldadas por el asesoramiento técnico, la ingeniería, la instalación y el servicio postventa por parte de los centros de servicio.</p>					●
	<p>ICK GROUP office 222, 89 A, Prospect Peremogy, Kyiv, 03115, Ukraine tel.: +38 (067) 215 10 32 fax: +38 (044) 451 02 30 e-mail: info@ick.ua https://ick.ua/</p>	<p>El Grupo ICK fabrica equipos bajo la marca propia GRANTECH. El grupo posee muchos años de experiencia en la aplicación de tecnologías de ahorro de energía y de tecnologías para pelletización de diferentes materiales.</p>					●
	<p>C.F. Nielsen A/S Solbjergvej 19 DK-9574 Baelum tel: +45 9833 7400 https://cfnielsen.com/</p>	<p>C. F. Nielsen es la marca líder mundial en el diseño y producción de soluciones de briqueteado mecánico para biomasa y residuos.</p>					●
	<p>PE "Briquetting Technologies" 13313, Ukraine, Zhytomyr region, c. Berdychiv, Semenivska str., 116 +38 (067) 410 21 02 bricteh@gmail.com https://briq-tech.com/</p>	<p>El conjunto de equipos para la producción de briquetas y pellets de combustible.</p>					●

ANEXO II: SISTEMAS DE ENERGÍA PARA PRODUCIR CALOR A PARTIR DE RESTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

More information from boiler producers can be found in the online table at the link below:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1hb1IEKkxIR_OStT5LOibOfZzggeZ-BjeARq33iwjiaE/edit#gid=0

Logo	Contacto	Descripción	Calderas pequeñas (100-500 kW)	Calderas medianas (500 kW - 1 MW)	Calderas grandes (más de 1MW)	Calderas de vapor
	Group COMPTE.R https://www.compte-r.com/en/	Desde hace más de 130 años, COMPTE.R innova y desarrolla nuevas soluciones de calor por biomasa, hasta convertirse en un especialista en energía de biomasa.			●	●
	DP CleanTech https://www.dp-cleantech.com/	La cartera de soluciones de biomasa de DP consta de tecnologías probadas, patentadas y líderes para combustión, gasificación y conversión de biogás a partir de biomasa para generar energía limpia.			●	●
	Babcock & Wilcox Vølund https://www.babcock.com/	B&W ofrece soluciones tecnológicas y servicios orientados a clientes energéticos e industriales de todo el mundo de forma segura, ética y según lo prometido.			●	●
	TTS eko s.r.o. https://www.ttsboilers.cz/	Dentro del programa ecológico, la empresa TTS se ocupa principalmente del desarrollo, la producción, el montaje y el mantenimiento de calderas industriales y salas de calderas para la combustión de biomasa.			●	
	Volyn-Kalvis LLC https://www.volyn-kalvis.com.ua/en/	Volyn-Kalvis LLC produce calderas automáticas de combustible sólido para calentamiento de agua con parrilla móvil para diferentes tipos de biomasa: serrín, astillas de madera, restos de campo de cereales, tallos de girasol y maíz, así como pellets de madera, girasol, turba y otros materiales vegetales.	●	●	●	
	Kruger boiler plant https://kruger.com.ua/	Calderas Kriger es una empresa con un ciclo completo de construcción llave en mano para negocios relacionados con la producción de energía térmica.		●	●	●

CONSORCIO AGROBIOHEAT

Logo	Descripción
	<p>CERTH es uno de los principales centros de investigación de Grecia. Entre sus áreas de especialización se incluyen actividades en fuentes de energía renovables, producción y utilización de biocombustibles sólidos, ahorro de energía y protección ambiental. www.certh.gr</p>
	<p>AVEBIOM es la Asociación Española de la Biomasa que representa a las empresas de toda la cadena de suministro de la bioenergía en España. www.avebiom.org</p>
	<p>BIOS es una empresa austriaca de I+D e ingeniería con más de 20 años de experiencia en el campo de la utilización energética de biomasa. www.bios-bioenergy.at</p>
	<p>Bioenergy Europe (antes conocida como AEBIOM) es la voz de la bioenergía europea. Su objetivo es desarrollar un mercado de bioenergía sostenible basado en condiciones comerciales justas. www.bioenergyeurope.org</p>
	<p>Food & Bio Cluster Denmark is the national Danish cluster for food and bioresources. We promote increased cooperation between research and business and offer our members one-stop-shop access to networks, funding, business development, projects, facilities and offer various consultancy services. www.foodbiocluster.dk</p>
	<p>Fundación CIRCE es un Centro Tecnológico fundado en España en 1993, que busca aportar soluciones innovadoras en el campo de la energía para un desarrollo sostenible. www.fcirce.es</p>
	<p>INASO-PASEGES es una organización civil sin fines de lucro, establecida en 2005 en Atenas por la Confederación Panhelénica de Sindicatos de Cooperativas Agrícolas (PASEGES). www.neapaseges.gr</p>
	<p>La Cooperativa de Energía Verde (ZEZ) se estableció en 2013 como parte del proyecto "Desarrollo de Cooperativas de Energía en Croacia" implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en Croacia. www.zez.coop</p>
	<p>El objetivo principal del Clúster es desarrollar el sector de la bioenergía en Rumanía y aumentar el interés hacia la producción y utilización de la biomasa. www.greencluster.ro</p>
	<p>UABIO se constituyó en 2013 como organismo público. El propósito de la actividad de la Asociación es crear una plataforma común para la cooperación en el mercado de bioenergía de Ucrania. www.uabio.org</p>

Logo	Descripción
	<p>AILE trabaja en energías renovables y ahorro de energía en zonas agrícolas y rurales del oeste de Francia. www.aile.asso.fr</p>
	<p>White Research es una empresa de consultoría e investigación social especializada en comportamiento del consumidor, análisis de mercado y gestión de la innovación con sede en Bruselas. www.white-research.eu</p>
	<p>Agronergy es un PSE (proveedor de servicios energéticos) francés dedicado a la soluciones térmicas renovables. www.agronergy.fr</p>



PUBLICACIÓN

Esta publicación de la Asociación de Bioenergía de Ucrania (UABIO) y Del Centro de Investigación y Tecnología de Hellas (CERTH) abarca cuestiones relacionadas con el estado actual de la producción de maíz, las características de su cultivo y las posibilidades de utilizar los restos de campo del cultivo de maíz para obtener energía. La guía ofrece una revisión de las tecnologías para la recolección de estos restos de campo y su uso para la producción de calor, energía, biogás y bioetanol. También incluye listas de empresas que ofrecen maquinaria para la recolección, la logística de los restos de campo del cultivo de maíz, su transformación en pellets/briquetas y sistemas energéticos para producir calor a partir de los mismos. La guía se ha creado en el marco del proyecto AgroBioHeat, cofinanciado por el programa Horizonte 2020 de la Unión Europea. AgroBioHeat tiene como objetivo promover soluciones de calor renovable con agrobiomasa económica y ambientalmente sostenibles en Europa.

AVEBIOM

La Asociación Española de la Biomasa (AVEBIOM) se constituyó en el año 2004 con el fin de promover el desarrollo del sector de la bioenergía en España. AVEBIOM es la unión de los actores principales del sector de la bioenergía que cubren toda la cadena de valor de la biomasa. El principal objetivo de la asociación es hacer crecer el consumo de biomasa con fines energéticos para que, de esta forma, crezcan nuestras empresas asociadas y su volumen de facturación.

En AVEBIOM damos visibilidad a las acciones y proyectos de avance del sector, defendemos los intereses del sector ante las administraciones europeas, nacionales regionales y locales, facilitamos contacto para generar colaboraciones, promovemos la innovación, participamos en proyectos y actividades para la eliminación de barreras y lograr un adecuado desarrollo del sector, divulgamos las oportunidades que ofrece el uso energético de la biomasa, y hacemos un seguimiento del mercado para facilitar información sobre el sector.

Visite www.avebiom.org para obtener más información.

CIRCE

CIRCE es un centro tecnológico fundado en 1993 en Zaragoza (España). Nuestra principal actividad está centrada en proporcionar soluciones innovadoras para un DESARROLLO SOSTENIBLE. El mayor activo de CIRCE es nuestro equipo multidisciplinar, formado actualmente por más de 250 personas altamente cualificadas. Trabajamos para mejorar la competitividad de las empresas mediante la generación de transferencia de tecnología a través de actividades de I+D y formación orientada al mercado en el ámbito de la sostenibilidad y eficacia de los recursos, las redes energéticas y las energías renovables. Nuestros números nos avalan, estamos involucrados en más de 70 proyectos de I+D a nivel nacional y europeo, y contamos con más de 250 clientes activos en nuestra cartera de clientes.

Visite www.fcirce.es para obtener más información.



UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No 818369

