



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE BIOETANOL EN VEHÍCULOS EN LA EMISIÓN DE CO₂

Autor: Manuel Soler de Loma-Ossorio

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Julio 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DEL.....

BIOETANOL EN VEHICULOS EN LA EMISION DE CO₂.....

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020-21... es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada

de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: 

Fecha: 06 / 07 / 2021

Renue

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:

Fecha: / /



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE BIOETANOL EN VEHÍCULOS EN LA EMISIÓN DE CO₂

Autor: Manuel Soler de Loma-Ossorio

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Julio 2021

ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE BIOETANOL EN VEHÍCULOS EN LA EMISIÓN DE CO₂

Autor: Soler de Loma-Ossorio, Manuel.

Director: Norverto Moriñigo, Juan

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se ha estudiado los procesos de cultivo, transformación y transporte para la producción de bioetanol como sustituto de la gasolina. Los resultados obtenidos indican que el bioetanol reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en un 43% si se utiliza maíz, y un 66% si se utiliza sorgo azucarero.

1. Introducción

La contaminación es uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la sociedad actual. Las emisiones de gases de efecto invernadero son responsables en gran medida del cambio climático que afecta al planeta. Además, la acumulación de contaminación en las grandes ciudades causa graves problemas sanitarios a la población, siendo responsable de miles de muertes prematuras cada año. En definitiva, las típicas boinas marrones de las grandes ciudades no son algo de lo que enorgullecerse.

Sólo en Madrid, el 46.9% de la contaminación es debida a los vehículos terrestres [1]. Iniciativas como Madrid Central se han puesto en marcha como forma de reducir el uso de los vehículos en la ciudad y fomentar el uso del transporte público o vehículos alternativos (bicicletas, monopatines o coches eléctricos, por ejemplo). Y aunque funcionan, estas medidas no están siendo suficientes.

El auge de los vehículos eléctricos es inevitable, pero todavía falta mucho tiempo hasta que sean la opción preferida para la población. Hay que encontrar el modo de reducir las emisiones de GEI hasta que todo el parque automovilístico sea eléctrico y sostenible.

La Unión Europea ha puesto en marcha directivas como la 2018/2001 o 2014/94/UE, cuyo propósito es el fomento de la energía procedente de fuentes renovables. Estas fuentes renovables incluyen los biocombustibles, por proceder de fuentes agrícolas. Se estima que el uso de biocombustibles puede reducir las emisiones GEI en hasta un 68% si se trata de biocarburantes de primera generación, e incluso porcentajes aún mayores si se trata de carburantes de segunda generación.

El objetivo de este proyecto es estudiar si el uso del bioetanol es una alternativa a los combustibles fósiles, y estudiar en qué medida puede contribuir a la descarbonización.

2. Metodología

A lo largo de este proyecto se va a evaluar la situación actual del bioetanol en España, la tecnología empleada, su viabilidad energética y sus emisiones. El proceso de producción de la materia prima empleada que más se utiliza en España (el maíz), el proceso de transformación de la materia prima a bioetanol y todos los procesos de transporte involucrados en el proceso serán estudiadas, así como las asociadas a la combustión del bioetanol en los vehículos.

Se evaluará también el proceso de transformación de los tallos de sorgo azucarero en bioetanol. Esta materia prima no es empleada en España, pero tanto el proceso de cultivo como el de transformación son más simples y económicos, por lo que podría tratarse de una buena alternativa al maíz.

Finalmente se realizará una comparación del bioetanol procedente de ambas materias primas con la gasolina, con el fin de demostrar si realmente el uso de biocarburantes es beneficioso. Los datos empleados en este estudio han tratado de reproducir lo más fielmente posible los métodos de las condiciones y métodos seguidos en España.

El Real Decreto 1597/2011 establece una serie de normas a seguir para el cálculo de las emisiones asociadas a los biocombustibles. Se ha tratado de seguir en la medida de lo posible estas indicaciones. Se establece por ejemplo que para el cálculo de las emisiones no que tener en cuenta ni las derivadas del consumo de biocombustibles ni la absorción de CO₂ por los cultivos.

3. Resultados y conclusiones

En primer lugar se ha estudiado la producción de la materia prima, su cultivo. Se ha estudiado el método de cultivo tanto del maíz como del sorgo, así como sus necesidades de fertilización, insecticidas, herbicidas y riego. Para todos los procesos se ha calculado el balance energético y de emisiones.

Se ha determinado que la producción de los productos fertilizantes es la que más impacto tiene en esta fase. No sólo la producción de estos productos sino también su consumo en la plantación, causante de una gran cantidad de NO₂. En la siguiente tabla se muestra el balance energético (MJ combustible fósil por MJ de bioetanol) y el balance de emisiones (g CO₂ equivalente por MJ de bioetanol) asociadas al proceso del cultivo de la materia prima:

	MJ/MJ		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Otras emisiones	-	-	24,15	12,49
Fertilizantes	0,12	0,07	7,34	7,46
Fitosanitarios	0,01	0,01	0,37	0,46
Maquinaria	0,03	0,04	2,03	2,79
Riego	0,01	0,01	0,61	0,62
TOTAL	0,16	0,12	34,50	23,82

Tabla 1: Balance energético y emisiones asociadas al cultivo de la materia prima

Seguidamente se ha procedido al estudio de los procesos de transformación de la materia prima a bioetanol. Como se ha dicho antes, se ha tratado de obtener información lo más parecida posible a los métodos seguidos en España. Los resultados obtenidos son muy diferentes para el maíz y para el sorgo. El maíz es una materia prima con alto contenido en almidón, y el sorgo con alto contenido en azúcar. El proceso de producción es parecido para ambas materias primas, pero necesita un paso extra en el caso del maíz.

Además, la producción de etanol desde el maíz necesita gas natural para suministrar el calor y la energía necesarios para todo el proceso. Durante este proceso, se produce energía excedentaria, que es vertida a la red. Las emisiones derivadas de esta energía se pueden

deducir del proceso. El sorgo, en cambio no utiliza gas natural. Antes de su transformación a bioetanol los tallos del sorgo son exprimidos para extraer el jugo que luego será transformado. A los tallos una vez exprimidos se le conoce como bagazo, que será utilizado como combustible.

En el caso del maíz, tanto el balance energético como el de emisiones tienen en cuenta la materia prima empleada y el gas natural, mientras que el sorgo sólo tiene en cuenta la materia prima. Los resultados son, por tanto, muy diferentes:

	MJ/MJ		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Materia prima	0,05	0,02	3,02	1,24
Transformación	0,18	0,00	20,47	0,00
Deducciones	-	-	-6,17	-
TOTAL	0,22	0,02	17,33	1,24

Tabla 2: Balance energético y emisiones asociadas al proceso de transformación

Luego, se ha analizado el balance asociado al transporte de la materia prima hasta la planta de etanol, luego de la planta a la refinería y finalmente de la refinería a la gasolinera. Se han realizado estimaciones para este balance. Se ha supuesto que toda la materia prima es cultivada en España. La distancia media estimada para el transporte a la planta de etanol es de 200km, aunque interesa que la distancia sea lo menor posible. Se ha calculado la distancia media de cada planta de etanol a las refinerías, obteniéndose una distancia aproximada de 592km. Finalmente, una distancia de 450km asegura la distribución a todas las gasolineras españolas. Se muestra el balance de esta fase a continuación:

	MJ/MJ		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Materia prima	0,014	0,074	0,084	5,125
A refinería	0,013	0,013	0,883	0,883
A gasolinera	0,010	0,010	0,671	0,671
DISTRIBUCIÓN	0,036	0,096	1,638	6,679

Tabla 3: Balance energético y emisiones asociadas al proceso de distribución

El balance energético final es 0.42MJ/MJ en el caso del maíz y 0.24MJ/MJ para el sorgo. Ambos resultados indican que la producción de etanol es excedentaria, se produce más energía de la consumida durante todo el proceso. Las emisiones finales quedan en 53.24 gCO₂/MJ para el maíz y 31.74gCO₂/MJ para el sorgo.

El proceso de combustión del bioetanol y de la gasolina han sido estudiados, obteniéndose que el etanol aporta una reducción del 1.7% de las emisiones. Esto implica que la gran reducción de emisiones no tiene lugar durante la combustión, sino antes.

Con los resultados obtenidos, se ha realizado una comparación con las emisiones asociadas a la gasolina [2], obteniéndose que el bioetanol, independientemente de su fuente reducen las emisiones de gases de efecto invernadero.

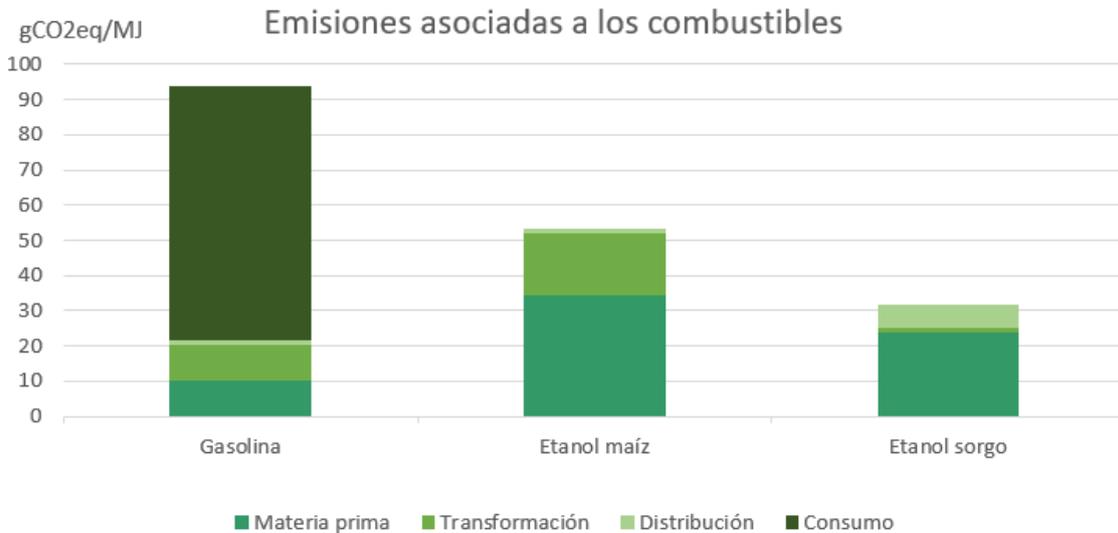


Figura 1: Emisiones asociadas a la gasolina y al bioetanol

Se ha estimado también el impacto global de las emisiones, teniendo en cuenta tanto la absorción de dióxido de carbono por la planta como el consumo del combustible. Los resultados mejoran los resultados en el caso del maíz, obteniéndose un balance negativo de las emisiones. En el caso del sorgo, las emisiones aumentan un poco, ya que la combustión del bagazo produce muchas emisiones también.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que los biocombustibles son una excelente alternativa a los combustibles fósiles. Sin embargo, se recomienda la investigación de tecnologías de producción de bioetanol de segunda generación, a partir de residuos agrícolas o cultivos no alimenticios.

4. Bibliografía

- [1] Diario del Ayuntamiento de Madrid, «¿Sabes cuál es el origen de la contaminación de Madrid?,» 2019. [En línea]. Available: <https://diario.madrid.es/blog/2019/01/15/sabes-que-provoca-la-contaminacion-en-madrid/>. [Último acceso: 16 Marzo 2021].
- [2] A. Hoekstra, «Producing gasoline and diesel emits more CO2 than we thought,» 16 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://innovationorigins.com/en/producing-gasoline-and-diesel-emits-more-co2-than-we-thought/>. [Último acceso: 1 Julio 2021].

STUDY OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF BIOETHANOL IN VEHICLES ON CO₂ EMISSIONS

Author: Soler de Loma-Ossorio, Manuel

Supervisor: Norverto Moriñigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project has studied the cultivation, transformation and transportation processes for the production of bioethanol as a substitute for gasoline. The results obtained indicate that corn ethanol reduces greenhouse gas emissions by 43%, and sweet sorghum stems ethanol by 66%.

1. Introduction

Pollution is one of the major problems faces by our society. Greenhouse gas emissions are responsible for the climate change that affects our planet. In addition, the accumulation of pollution in large cities causes serious health problems for the population and is responsible for thousands of premature deaths each year. In short, the typical brown berets of big cities are nothing to be proud of.

In Madrid alone, 46.9% of pollution is due to land vehicles [1]. Initiatives such as Madrid Central have been put in place as a way to reduce the use of vehicles in the city and encourage the use of public transport or alternative vehicles (bicycles, scooters or electric cars, for example). And even if these measures work, they are not enough.

The rise of electric vehicles is inevitable, but there is still a long way to go before they become the preferred choice of population. We must find a way to reduce GHG emissions until the entire car fleet is electric and sustainable.

The European Union has implemented directives such as 2018/2001 or 2014/94/EU. They aim to promote energy from renewable sources. These renewable sources include biofuels, as they come from agricultural sources. It is estimated that the usage of biofuels may reduce GHG emissions by up to 68% in the case of first generation biofuels, and even higher percentages in the case of second generation biofuels.

Therefore, the aim of this project is to study whether the use of bioethanol is an alternative to fossil fuels, and to study to what extent it can contribute to decarbonization.

2. Methodology

Throughout this project, the current situation of bioethanol in Spain, the technology employed, its energy balance and emissions will be assessed. The production process of the raw material most widely used in Spain (corn), the process of transforming the raw material into bioethanol and all the transport processes involved in the life of bioethanol will be studied, as well as those associated with bioethanol combustion in vehicles.

The process of transforming sugar sorghum stalks into bioethanol will also be evaluated. This raw material is not used in Spain, but both the cultivation process and the transformation process are simpler and cheaper than corn, so it could be a good alternative.

Finally, a comparison will be made between corn ethanol, sorghum ethanol and gasoline, in order to demonstrate whether the use of biofuels is really beneficial. The data used in this study has tried to reproduce as closely as possible the methods and conditions of Spain.

Royal Decree 1597/2011 establishes a methodology to be followed for the calculation of emissions associated with biofuels. An attempt has been made to follow these indications as closely as possible. For example, it establishes that neither the emissions derived from the consumption of biofuels nor the absorption of CO₂ by crops should be taken into account in the calculation of GHG.

3. Results and conclusions

Firstly, the cultivation of corn and sorghum was studied, as well as their needs for fertilization, insecticides, herbicides and irrigation. The energy balance and emissions were calculated for all processes.

It has been determined that the production of fertilizer products has the greatest impact in this phase. Not only the production of these products but also their consumption in the plantation, which causes a large amount of NO₂ emissions. The following table shows the energy balance (MJ of fossil fuel per MJ of bioethanol) and emissions (g equivalent CO₂ per MJ of bioethanol) associated with the raw material cultivation process:

	MJ/MJ		gCO ₂ /MJ	
	Corn	Sorghum	Corn	Sorghum
Other emissions	-	-	24,15	12,49
Fertilizers	0,12	0,07	7,34	7,46
Protection products	0,01	0,01	0,37	0,46
Machinery	0,03	0,04	2,03	2,79
Irrigation	0,01	0,01	0,61	0,62
TOTAL	0,16	0,12	34,50	23,82

Table 1: Energy balance and emissions due to farming process

Then, the transformation process was studied. As mentioned above, data sources were chosen trying to be as similar as possible as the processes followed in Spain. The results obtained are very different for corn and sorghum. Corn is a cereal with a high starch content, and sorghum with a high sugar content. The production process is similar for both feedstocks, but requires an extra step in the case of corn, thus requiring more energy.

In addition, in Spain the production of corn ethanol corn uses natural gas to supply the heat and energy needed for the entire process. During this process, surplus energy is produced, which is fed into the grid. The emissions derived from this energy can be deducted from those of the process. Sorghum, on the other hand, does not use natural gas. Before being transformed into bioethanol, sorghum stems are squeezed to extract the juice that will later be transformed. Once the stems have been squeezed, known as bagasse, they will be used as fuel.

In the case of corn, both the energy balance and the emissions balance take into account the raw material used and the natural gas, while sorghum only takes into account the raw material. The results are therefore very different:

	MJ/MJ		gCO ₂ /MJ	
	Corn	Sorghum	Corn	Sorghum
Raw material	0,05	0,02	3,02	1,24
Transformation	0,18	0,00	20,47	0,00
Deductions	-	-	-6,17	-
TOTAL	0,22	0,02	17,33	1,24

Table 2: Energy balance and emissions due to transformation process

Then, energy balance and emissions due to transportation of feedstock to the ethanol plant, from the plant to the refinery and finally from the refinery to the gas station was analyzed. Estimates have been made for this calculation. It has been assumed that all feedstock is grown in Spain. The estimated average distance for transport to the ethanol plant is estimated to be 200 km, as it is important to keep the distance as short as possible. The average distance from each ethanol plant to the refineries has been calculated, resulting in a distance of approximately 592 km. Finally, a distance of 450 km ensures distribution to all Spanish gas stations. The balance of this phase is shown below:

	MJ/MJ		gCO ₂ /MJ	
	Corn	Sorghum	Corn	Sorghum
Raw material	0,014	0,074	0,084	5,125
To refinery	0,013	0,013	0,883	0,883
To gas station	0,010	0,010	0,671	0,671
TOTAL	0,036	0,096	1,638	6,679

Table 3: Energy balance and emissions due to transportation

The final energy balance is 0.42MJ/MJ for corn ethanol and 0.24MJ/MJ for sorghum. Both results indicate that more energy is produced than it is consumed during the entire process. The final emissions are 53.24 gCO₂/MJ for corn and 31.74gCO₂/MJ for sorghum.

The combustion process of bioethanol and gasoline have been studied, obtaining that ethanol reduces emissions by 1.7%. This implies that the great reduction in emissions does not take place during combustion, as it is very small, but before.

With the results obtained, a comparison has been made with the emissions associated with gasoline [2], obtaining that bioethanol, regardless of its source, reduces GHG emissions.

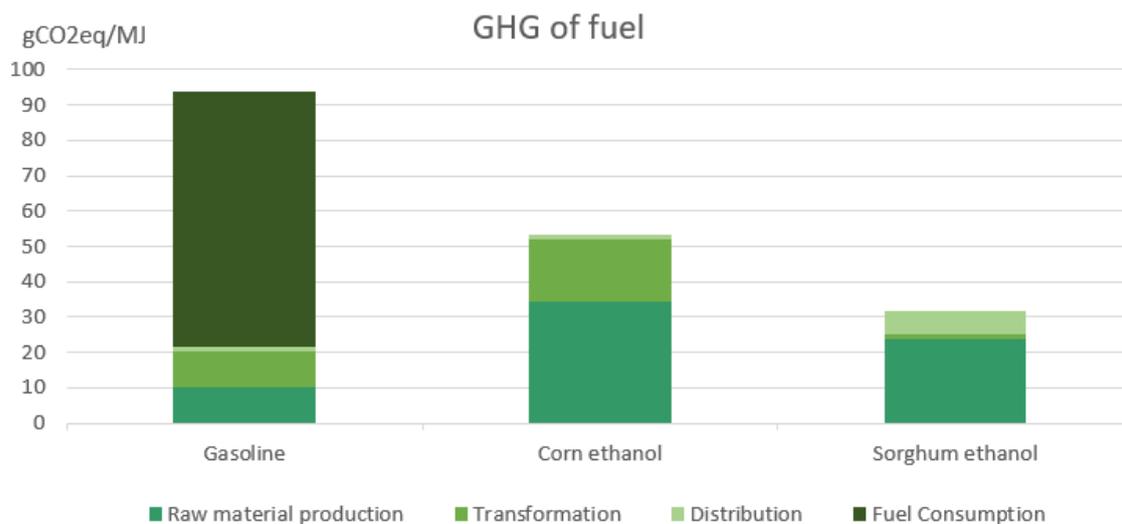


Figure 1: Emissions of gasoline and bioethanol

The overall impact of emissions has also been estimated, taking into account both carbon dioxide absorption by the plantation and fuel consumption. The results further improve the results in the case of corn, obtaining negative emissions. In the case of sorghum, emissions increase slightly, since the combustion of bagasse also produces GHG.

In view of the results obtained, it can be stated that biofuels are an excellent alternative to fossil fuels. However, research into second generation bioethanol production technologies from agricultural residues or non-food crops is recommended.

4. Bibliography

- [1] Diario del Ayuntamiento de Madrid, «¿Sabes cuál es el origen de la contaminación de Madrid?,» 2019. [En línea]. Available: <https://diario.madrid.es/blog/2019/01/15/sabes-que-provoca-la-contaminacion-en-madrid/>. [Último acceso: 16 Marzo 2021].
- [2] A. Hoekstra, «Producing gasoline and diesel emits more CO₂ than we thought,» 16 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://innovationorigins.com/en/producing-gasoline-and-diesel-emits-more-co2-than-we-thought/>. [Último acceso: 1 Julio 2021].

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Historia	8
1.2 Metodología y objetivos	11
Capítulo 2. Normativa	13
2.1 Introducción.....	13
2.2 Organización Internacional de Normalización.....	13
2.3 En la Unión Europea	15
2.4 En España.....	16
Capítulo 3. Estado del arte	19
3.1 El etanol.....	19
3.2 La materia prima	20
3.2.1 El maíz.....	24
3.2.2 El sorgo azucarero	29
3.3 Producción de bioetanol	32
3.3.1 3.3.1 Primera generación.....	32
3.3.2 Segunda generación	38
3.3.3 Tercera generación	42
3.3.4 Cuarta generación.....	42
3.4 Consumo del bioetanol.....	43
3.4.1 Bioetanol como combustible.....	43
3.4.2 Mezcla de bioetanol y gasolina	43
3.4.3 Bioetanol como aditivo.....	44
3.5 Situación del bioetanol en España.....	45
3.5.1 Materia prima usada en España	45
3.5.2 Producción de bioetanol.....	52
3.6 Proyectos actuales en España	54
3.6.1 EA Green Energy.....	55
3.6.2 Perseo biotechnology	55

3.6.3 Clamber.....	56
Capítulo 4. Análisis del caso	59
4.1.1 Cultivo del maíz.....	62
4.1.2 Conversión del maíz a bioetanol	65
4.2 Producción de bioetanol a partir del sorgo	69
4.2.1 Cultivo del sorgo	71
4.2.2 Conversión de los tallos de sorgo a bioetanol	73
4.3 Fase de transporte.....	75
<i>Transporte materia prima</i>	75
<i>Distribución etanol</i>	75
4.4 Consumo de combustible en vehículos.	77
Capítulo 5. Resultados.....	83
5.1 Balance energético y de emisiones de las fases agrícolas.	83
5.2 Balance energético y de emisiones de la fase de transformación.....	85
5.3 Emisiones a la fase de transporte.....	87
5.4 Balance y emisiones asociadas a todo el proceso.....	88
Capítulo 6. Conclusiones.....	91
6.1 Conclusiones metodología	91
6.2 Conclusiones resultados	92
<i>Bibliografía</i>	95
ANEXO I	103

Índice de figuras

Figura 1: Producción de bioetanol en el mundo. Fuente: Statista	10
Figura 2: Consumo de biocombustibles de 2010 a 2019. Fuente: CNMC	11
Figura 3: Principales productores de maíz, 2019. Fuente: FAO	25
Figura 4: Partes del grano de maíz	27
Figura 5: Cosechadora de granos.....	28
Figura 6: Principales productores de sorgo, 2019. Fuente: FAO	29
Figura 7: Picadora cosechadora.....	31
Figura 8: Producción de bioetanol de 1ª generación según su materia prima	32
Figura 9: Molino de martillos.....	34
Figura 10: Esquema producción ETBE	44
Figura 11: Procedencia de la materia prima para bioetanol. Fuente: CNMC	46
Figura 12: Producción de maíz en España, de 1961 a 2019	47
Figura 13: Hectáreas destinadas al cultivo del maíz por provincias en 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de MAPA	48
Figura 14: Rendimiento del maíz por provincias en 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de MAPA	49
Figura 15: Pluviometría anual y embalses en 2019. Fuente: SIGA	49
Figura 16: Producción de sorgo en España, de 1961 a 2019. Fuente: FAO.....	50
Figura 17: Producción de sorgo por provincias, 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de MAPA.....	51
Figura 18: Producción, importación, exportación y consumo de bioetanol en España, de 2010 a 2019. Fuente CNMC.....	52
Figura 19: Planta Biocarburantes Castilla y León	53
Figura 20: Ubicación de las 4 plantas de bioetanol en España.....	54
Figura 21: Esquema funcionamiento proyecto Waste2Bio	56
Figura 22: Esquema producción de bioetanol a partir del maíz	60
Figura 23: Esquema conversión del maíz a bioetanol y coproductos	65
Figura 24: Esquema producción de bioetanol a partir del sorgo	69

Figura 25: Esquema conversión del sorgo a bioetanol y coproductos	73
Figura 26: Instalaciones de CLH. Fuente: clh.es.....	76
Figura 27: Consumo energético asociado a la fase agrícola del maíz y sorgo.	84
Figura 28: Emisiones GEI asociadas a la fase de transformación a bioetanol	86
Figura 29: Emisiones GEI asociadas a los combustibles	89
Figura 30: Impacto final combustibles	90

Índice de tablas

Tabla 1: Países miembros y países observadores del Comité Técnico 28/SC 7	14
Tabla 2: Normas de ISO/TC 28/SC 7.....	15
Tabla 3: Objetivos mínimos del consumo de biocombustibles.....	16
Tabla 4: Propiedades del etanol.....	19
Tabla 5: Rendimiento agrícola y conversión a bioetanol a partir de distintas materias primas. Fuente: FAO, MAPA.....	24
Tabla 6: Composición de las partes del grano de maíz. Fuente: FAO	27
Tabla 7: Materia prima utilizada en España, de 2015 a 2019. Fuente: CNMC.....	45
Tabla 8: Uso de fertilizantes para el maíz. Fuente: ecoinvent3.6.....	62
Tabla 9: Consumo de productos fitosanitarios para el maíz. Fuente: ecoinvent3.6	63
Tabla 10: Consumo de agua en la producción del maíz. Fuente: ecoinvent3.6	63
Tabla 11: Uso de maquinaria agrícola y consumo para el maíz. Fuente: MAPA	65
Tabla 12: Consumo de materia prima y energía para la producción de bioetanol a partir de maíz.	67
Tabla 13: Uso de fertilizantes del sorgo. Fuente: ecoinvent3.6.....	71
Tabla 14: Consumo de productos fitosanitarios para el sorgo. Fuente: ecoinvent3.6.....	71
Tabla 15: Consumo de agua para el riego del sorgo. Fuente: ecoinvent3.6.....	72
Tabla 16: Uso de maquinaria agrícola y consumo para el sorgo. Fuente: MAPA	72
Tabla 17: Consumo de materia prima y productos en la producción de bioetanol a partir del sorgo. Fuente: ecoinvent3.6.....	74
Tabla 18: Propiedades gasolina y etanol puro	77
Tabla 19: Composición aproximada del aire.....	78
Tabla 20: Propiedades y emisiones de los combustibles.....	81
Tabla 21: Consumo energético asociado a la fase agrícola del maíz y sorgo.	83
Tabla 22: Emisiones GEI asociadas a la fase de cultivo del maíz y del sorgo.....	84
Tabla 23: Consumo energético asociado a la fase de transformación a bioetanol.	85
Tabla 24: Emisiones GEI asociadas a la transformación del sorgo.....	86
Tabla 25: Balance energético asociado al transporte.....	87

Tabla 26: Emisiones asociadas al transporte	87
Tabla 27: Balance energético del bioetanol.....	88
Tabla 28: Emisiones GEI del bioetanol.....	88
Tabla 29: Emisiones GEI asociadas a la producción y consumo de la gasolina	89
Tabla 30: Impacto final CO2 biocombustibles.....	90
Tabla 31: Factor de emisión de los fertilizantes	103
Tabla 32: Factor de emisión de productos fitosanitarios.....	103
Tabla 33: Factor de emisión del consumo del diésel por la maquinaria agrícola. Fuente: ecoinvent3.6.....	104
Tabla 34: Factor de emisión del riego. Fuente: ecoinvent3.6.....	104
Tabla 35: Factor de emisión de la materia prima.	104
Tabla 36: Factor de emisión de calor y energía en planta de cogeneración. Fuente: ecoinvent3.6.....	104

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son y han sido la principal fuente de energía del ser humano desde la primera revolución industrial. El carbón, el petróleo y el gas natural se han usado indiscriminadamente en la industria, contribuyendo en gran medida al calentamiento global. La contaminación derivada de estos combustibles es un gran problema en las grandes ciudades del mundo, causando cientos de miles de muertes prematuras al año.

Todas las grandes ciudades del planeta son dueñas de una inmensa boina marrón de contaminación, que aunque a veces parezca que no está, en realidad sí. Según el ayuntamiento de Madrid, el 46.9% [1] de la contaminación de la ciudad es debida a los vehículos terrestres. Iniciativas como Madrid Central se han puesto en marcha como forma de reducir el uso de los vehículos en la ciudad y fomentar el uso del transporte público o vehículos alternativos (bicicletas, monopatines o coches eléctricos, por ejemplo). Y aunque funcionan, estas medidas no están siendo suficientes.

El petróleo es el combustible por excelencia en el sector automovilístico, ya sea gasolina o diésel, aunque cada vez se ven más vehículos eléctricos e incluso vehículos que funcionan con GLP. Los vehículos eléctricos suponen un gran avance para reducir la contaminación en ciudades, sin embargo presentan varios problemas.

Primero de todo, las baterías se fabrican a partir de materiales como el litio, níquel y cobalto. La extracción de estos materiales es muy contaminante, y perjudicial para el medio ambiente. El 60% [2] del cobalto del mundo proviene del Congo, donde muy a menudo se extra en condiciones inhumanas. Otro inconveniente es que las baterías pierden capacidad con su uso, de modo que a lo largo de la vida útil del vehículo es probable que haya que cambiar las baterías más de una vez. Además, su reciclaje es muy complejo y caro. Por otro lado, el GLP, o gas licuado del petróleo, como su propio nombre dice proviene del petróleo y por tanto no es renovable. Además, si se compara con los combustibles tradicionales no presentan una gran mejora en cuanto a sus emisiones de gases contaminantes.

Pero la expansión de los vehículos eléctricos es inevitable. Cada año se producen mejoras en el sector y se desarrollan técnicas de reciclaje para componentes de vehículos eléctricos, proporcionando una segunda vida a partes que antes se tiraban a la basura. Cada vez hay más vehículos eléctricos, pero de momento no son aptos ni para todos los bolsillos ni para todas las necesidades de los consumidores. Se necesita por tanto una alternativa a los combustibles tradicionales, que sirva como transición entre la gasolina y los vehículos eléctricos.

Los biocombustibles pueden ser una buena alternativa. Se trata de combustibles renovables y sostenibles, que contaminan menos y además su precio es asequible. El uso de biocombustibles no supone un gran cambio respecto a los combustibles tradicionales. No requiere una inversión en infraestructura para su distribución ya que se puede seguir utilizando una gasolinera común o medios tradicionales de distribución. Los vehículos deben ser adaptados a este tipo de combustible, pero esto no debería suponer ningún problema a nivel técnico. Ya existen los vehículos FFV (flex-fuel vehicle), adaptados para funcionar con hasta un 100% de bioetanol. Un inconveniente es la autonomía. Una tonelada de bioetanol equivale a 0.64 toneladas equivalentes de petróleo [3]. El diésel en cambio equivale a 1.01 tep, y la gasolina 1.07 tep. El bioetanol por tanto, es menos eficiente. Sin embargo, el balance total es positivo.

1.1 HISTORIA

La historia del etanol es relativamente larga. Ya se usaba antes de la aparición de los vehículos como combustible para lámparas o para cocinar. En 1826, el inventor estadounidense Samuel Morey utilizó el etanol en un motor de combustión interna [4]. Años más tarde, en 1860 Nicolaus Otto

(5), un ingeniero alemán lo utilizó también en uno de sus motores. Este ingeniero alemán construyó en 1876 el primer motor de cuatro tiempos, sobre el que se basarían todos los motores de combustión interna.

En la segunda mitad del siglo XIX, en Estados Unidos los elevados impuestos al alcohol supusieron un mazazo a los biocombustibles, impulsando la industria petrolera. Esos impuestos estaban dirigidos a las bebidas alcohólicas, pero como no se declaró lo contrario también se aplicaron a los biocombustibles. En Europa esto no ocurrió, y países como Francia o Alemania vieron los biocombustibles como medio para no depender del petróleo, ya que no había casi reservas de petróleo en sus países. Además se fomentaba el desarrollo rural y la autarquía de los países.

A comienzos del siglo XX, Reino Unido vio también el etanol como sustituto al petróleo. Sin embargo, en 1921 el Comité del alcohol como combustible [5] declaró que el coste del etanol comparado con el petróleo solo lo hacía viable en países tropicales, donde disponían de cultivos como la caña de azúcar.

Henry Ford fabricaría en 1908 el icónico Ford Model T, considerado el primer vehículo asequible para las clases medias estadounidenses. Este vehículo podía funcionar con una mezcla de etanol y gasolina. De hecho, Ford pensó en este coche para los granjeros americanos, que podrían fabricar su propio combustible en sus hogares. Según el mismo Henry Ford, el combustible del futuro era alcohol etílico elaborado a partir de productos agrícolas; el etanol [6]. Debido a las pocas reservas de petróleo, el uso del etanol aumentó temporalmente durante la Segunda Guerra Mundial [4]. Sin embargo, una vez terminada la guerra la situación del petróleo se normalizó y el etanol pasó a un tercer plano, quedando en el olvido.

La crisis del petróleo de 1973 sería la causante del resurgir del bioetanol. Los gobiernos de Brasil y Estados Unidos comenzaron a fomentar el uso del bioetanol entre sus ciudadanos, convirtiéndose ambos países en los principales productores y consumidores de etanol del mundo hasta hoy. [7]

Producción de bioetanol por el mundo
(en miles de metros cúbicos)

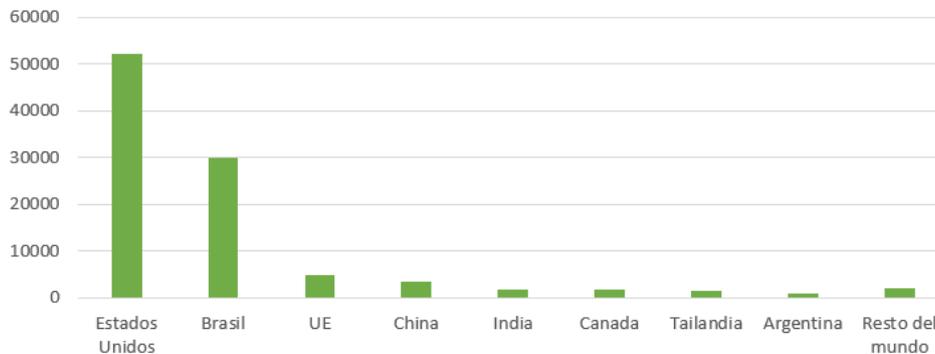


Figura 1: Producción de bioetanol en el mundo. Fuente:

En Brasil, la mayoría de los coches (más del 80% en el año 2010 [8]) son de tipo FFV (vehículo de combustible flexible). Se trata de vehículos adaptados que pueden funcionar con E25 (25% de bioetanol y 75% de gasolina convencional) o incluso con E100 (100% bioetanol). En España en cambio, no ha sido hasta el año 2020 cuando se comenzó a comercializar la gasolina E10 en las estaciones de servicio españolas.

Actualmente la Unión Europea está fomentando su uso en los países miembros. Por ello, los países europeos están aumentando su importación, e incluso la producción de materias primas para su producción. Según la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), el 95% del bioetanol utilizado en España es producido en nuestro país, mientras que alrededor de la mitad del biodiesel procede del extranjero. Sobre el consumo de biocombustibles en España, el Real Decreto 1085/2015 estableció que para el año 2019, el consumo total de combustibles renovables debería ser como mínimo del 7% del total, y para el año 2020, por lo menos el 8.5%. Según el CNMC, durante el año 2019 solamente se alcanzó el 6%, quedándose el uso de los biocombustibles un punto por debajo del objetivo fijado. Sin embargo, de este porcentaje la gran mayoría es biodiesel, representando el bioetanol únicamente el 14% en el año 2019, como puede verse en la figura 2.

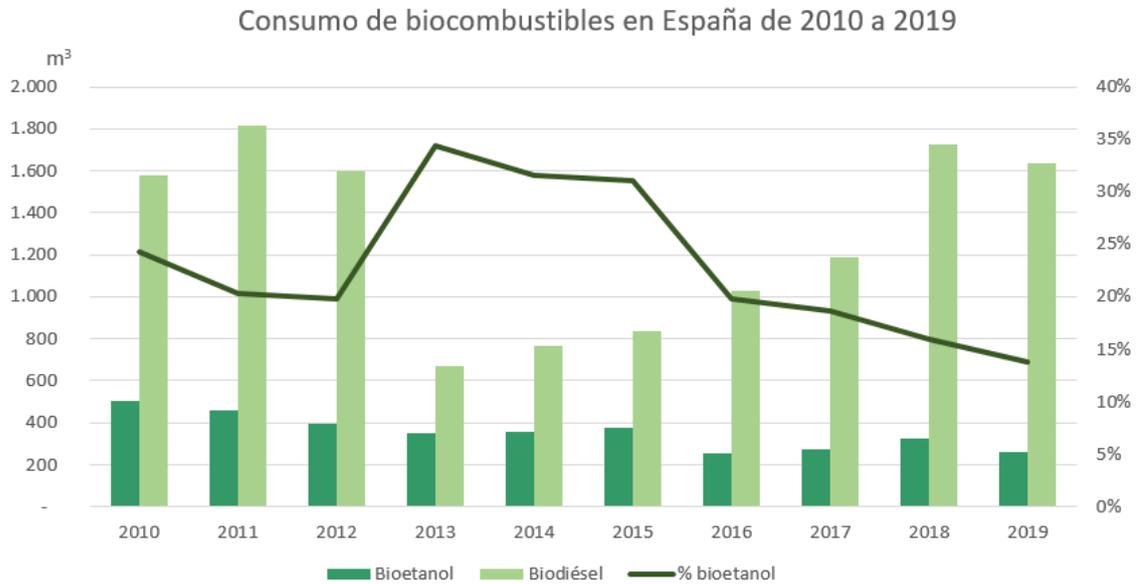


Figura 2: Consumo de biocombustibles de 2010 a 2019. Fuente: CNMC

Actualmente, se está fomentando también el uso de biocombustibles en el transporte marítimo. La empresa danesa Maersk es la compañía de transporte marítimo de mercancías más grande del mundo, y en 2019 en una nota de prensa indicaron que para lograr un balance nulo de emisiones había que utilizar biocombustibles. En esa misma nota de prensa, la naviera decía que el uso de baterías o celdas de combustible no van a tener un papel relevante en la reducción de sus emisiones. El transporte marítimo de mercancías representa alrededor del 3% de las emisiones de gases de efecto invernadero del mundo, por lo que sus acciones pueden tener un gran impacto [9].

1.2 METODOLOGÍA Y OBJETIVOS

En los siguientes capítulos se va a realizar un estudio de la situación actual del bioetanol a nivel nacional. Se va a estudiar las tecnologías de producción de biocombustibles, así como el cultivo de la materia prima necesaria. Se va a analizar asimismo los procesos de distribución de los productos.

Se va a realizar un balance energético, dónde se pretende ver si producir biocombustible sale rentable energéticamente. Un balance de emisiones de gases de efecto invernadero será calculado también, para poder compararlo con las emisiones asociadas a la producción y consumo de los combustibles tradicionales, en este caso la gasolina.

Los datos que se han utilizado para este análisis han sido obtenidos de diversas fuentes, que se irán incluyendo a medida que se utilizan. Se ha tratado de obtener datos de los procesos realizados en España, o lo más similares posibles.

Capítulo 2. NORMATIVA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se va a describir la normativa vigente relativa a los biocombustibles, así como decretos o directivas de la Unión Europea o del Gobierno de España.

Las normas son de vital importancia, ya que tratan de asegurar una calidad y unos estándares de modo que los productos sus características y propiedades independientemente de su lugar de origen. Las directivas o decretos son actos administrativos formulados por los gobiernos. Tratan de conseguir unos resultados u objetivos en un plazo de tiempo, que mediante ciertas medidas tratan de fomentar o regular algo.

2.2 ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN.

La Organización Internacional de Normalización es una organización cuya labor es la creación de estándares y normas internacionales, con el fin de facilitar el comercio y la seguridad internacional [10]. La organización, que fue fundada en 1947, se encuentra asimismo subdivida en Comités Técnicos, que se encargan del desarrollo de normas dentro de un campo específico.

El Comité Técnico encargado de combustibles (derivados o no del petróleo) es el ISO/TC 28, que fue creado en 1947. Al ser los combustibles un campo muy amplio y de gran importancia, el comité se encuentra subdividido en subcomités. De este modo, es el ISO/TC 28/SC 7 el que se encarga de los biocombustibles líquidos. El subcomité es relativamente reciente, ya que fue creado en 2007. A día de hoy, cuenta con 24 países miembros y 13 países observadores, que se encuentran recogidos en la siguiente tabla.

ISO/TC 28/SC 7

<u>Países miembros</u>	<u>Países observadores</u>
Argentina	Bielorrusia
Austria	Bélgica
Brasil	Bulgaria
China	Egipto
República Checa	Estonia
Francia	Finlandia
Alemania	Israel
India	Mongolia
Indonesia	Serbia
Irán	Eslovaquia
Italia	Suiza
Japón	Tailandia
República de Corea	Uruguay
Malasia	
Países Bajos	
Nueva Zelanda	
Nigeria	
Polonia	
Rumanía	
Federación Rusa	
España	
Suecia	
Reino Unido	
Estados Unidos	

Tabla 1: Países miembros y países observadores del Comité Técnico 28/SC 7

El subcomité se encarga de la normalización de la terminología, clasificación y especificaciones para los biocombustibles líquidos. También del análisis y pruebas en biocombustibles líquidos puros. El subcomité ha publicado 5 normas, y actualmente se encuentra desarrollando 4.

Título	Descripción
ISO/TS 17306:2016	Productos petrolíferos - Biodiésel - Determinación de la glicerina libre y total y de los mono-, di- y tricilgliceroles por cromatografía de gases
ISO/TS 17307:2016	Productos petrolíferos - Biodiesel - Determinación del contenido de ésteres totales por cromatografía de gases
ISO 17308:2015	Productos petrolíferos y otros líquidos – Etanol – Determinación de la conductividad eléctrica
ISO 17315:2014	Productos petrolíferos y otros líquidos – Etanol – Determinación de la acidez total por valoración potenciométrica
ISO 20424:2019	Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) - Determinación del contenido de azufre - Método de espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)

Tabla 2: Normas de ISO/TC 28/SC 7

2.3 EN LA UNIÓN EUROPEA

A nivel europeo, la Directiva 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 Del 11 de diciembre de 2018 [11] . Esta directiva es relativa al fomento de la energía procedente de fuentes renovables, y establece que para el año 2030, como mínimo el 32% de la energía deberá proceder de fuentes renovables. La directiva, de forma sintetizada:

- Establece un marco común para promover la energía procedente de fuentes renovables, mediante una serie de normas comunes para el uso de la energía renovable.
- Regula el autoconsumo, permitiendo a los consumidores participar en la transición energética.
- Se simplifican los trámites para los proyectos de renovables, así como un sistema de garantías.
- Refuerza los criterios de sostenibilidad para la bioenergía, que se aplica a todos los biocombustibles.

Por otro lado, la Directiva 2014/94/UE [12] trata sobre el desarrollo de la Infraestructura para los combustibles alternativos. La directiva emplaza a los países miembros de la Unión

Europea a establecer un marco de acción nacional para el desarrollo de los combustibles alternativos, incluyendo, entre otros, los siguientes elementos:

- Evaluación de la situación actual y su futura evolución de mercado.
- Objetivos nacionales que podrán modificarse a partir de la evolución de la demanda.
- Medidas necesarias para garantizar que las metas sean alcanzadas.
- Medidas para fomentar la implantación de infraestructura.

2.4 EN ESPAÑA

En relación a la Directiva 2014/94/UE, en España se puso en marcha el Real Decreto 1085/2015 [13] , por el cual se fomenta el uso de biocombustibles en el país. El Decreto establece:

- Los siguientes objetivos mínimos obligatorios para el consumo de combustibles renovables:

2017	2018	2019	2020	2021	2022
5 %	6 %	7 %	8,5 %	9.5 %	10 %

Tabla 3: Objetivos mínimos del consumo de biocombustibles.

- Para el año 2020 el porcentaje de energía renovable proveniente de materia prima como cereales u otros cultivos plantados en tierras agrícolas con fines energéticos no puede superar el 7% de la energía total en transportes.
- Se fomenta la producción de biocombustibles producidos a partir de residuos, ya que al no añadir la necesidad de suelo adicional se reduciría considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero.
- Se recoge la obligación de recopilar datos anuales sobre las emisiones y ahorros energéticos.

El Real Decreto 1597/2011 [14] es también de gran importancia. Se regulan los criterios de sostenibilidad de biocarburantes y biolíquidos. Se establece que la reducción de emisión de gases de efecto invernadero derivada del uso de biocombustibles debe ser del 50% en instalaciones operativas antes del 5 de octubre de 2015, y del 60% en instalaciones que comiencen a estar operativas después del 5 octubre de 2015. Se establecen las características del terreno a utilizar para la producción de biocombustibles con el fin de proteger el medio ambiente.

También establece un sistema nacional de verificación de la sostenibilidad de los biocarburantes, siendo el Ministerio de Industria, Turismo y comercio la entidad supervisora y la Comisión Nacional de Energía la entidad de certificación de consumo y venta de biocarburantes.

Capítulo 3. ESTADO DEL ARTE

3.1 EL ETANOL

El bioetanol es un alcohol etílico (C₂H₅OH), que en condiciones normales, es un líquido incoloro. Debido a sus propiedades, puede ser utilizado como combustible, ya sea mezclado con gasolina o solo. A continuación se muestra una tabla con las propiedades físicas, químicas y termoquímicas.

Propiedades físicas	
Apariencia	Líquido
Densidad	789 kg/m ³
Masa molecular	46.07 g/mol
Punto de fusión	-114°C
Punto de ebullición	78C
Temperatura crítica	241°C
Propiedades químicas	
Acidez (pK _a)	15.9
Solubilidad	Miscible
Termoquímica	
$\Delta_f H^0$ gas	-253.3 kJ/mol
$\Delta_f H^0$ líquido	-277.6 kJ/mol
S ⁰ líquido, 1 bar	161.21 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹

Tabla 4: Propiedades del etanol

El etanol puede obtenerse a través del petróleo, aunque principalmente se obtiene a partir de biomasa; entonces se le puede llamar bioetanol. Independientemente del proceso de obtención, su composición química es idéntica. La única forma para distinguir ambos tipos es mediante la prueba ASTM D6866 [15], datación por radiocarbono. Todos los seres vivos presentan los mismos niveles de C¹⁴. Una vez mueren, esos niveles decaen lentamente, hasta que pasados unos 50.000 años no queda nada. De este modo, el bioetanol obtenido a partir de biomasa presenta el isótopo C¹⁴, mientras que el etanol sintético no. La mayor parte del etanol proviene a partir de la biomasa, principalmente maíz, trigo, caña de azúcar o

remolacha, entre otros. En España el 97.2% del bioetanol producido en el año 2020 proviene del maíz [16]. El principio de obtención del etanol es bastante simple; cualquier residuo vegetal puede ser transformado en azúcar, y posteriormente convertido en bioetanol. Sin embargo, dependiendo de la composición química de la biomasa, el proceso se complica bastante.

Para producir el bioetanol a partir de la materia vegetal son necesarios tres pasos. Primero de todo se realiza la fermentación anaeróbica (sin presencia de oxígeno) de los azúcares. Microorganismos como bacterias o levaduras transforman el azúcar. A continuación se realiza una destilación, separando el etanol. Durante este proceso aparece un azeótropo de agua-etanol con un bajo punto de ebullición, limitando la pureza del etanol al 95%. Para poder utilizar el etanol como combustible, es necesario un último proceso, que es el que más retos presenta, la deshidratación del etanol. Se puede realizar por tres métodos diferentes, destilación azeotrópica con benceno o ciclohexano, destilación extractiva o mediante tamices moleculares. Una vez finalizado el proceso se obtiene bioetanol, CO₂ e incluso se pueden reutilizar los restos de la materia prima para alimento para el ganado.

3.2 LA MATERIA PRIMA

El bioetanol es obtenido a partir de la fermentación de los azúcares presentes en la biomasa. El proceso de producción del etanol no es el mismo para las distintas formas de biomasa, sino que varía según el tipo de fermentación. Se puede dividir la materia prima en las siguientes categorías:

- Materias primas con alto contenido en sacarosa.
 - Caña de azúcar
 - Remolacha
 - Melaza
 - Sorgo dulce
- Materias primas con alto contenido en almidón
 - Maíz
 - Trigo
- Materias con alto contenido de celulosa

- Madera
- Residuos agrícolas
- Otras materias
 - Pastos perennes
 - Algas

Recientemente se están llevando a cabo estudios que pretenden analizar la viabilidad de la utilización de organismos genéticamente modificados para la producción de bioetanol. Por ejemplo, la caña genéticamente modificada, al tener un alto contenido en lípidos, podría ser utilizada para producir bioetanol y biodiesel al mismo tiempo. [17]

A continuación se va a realizar una breve descripción de las principales materias primas utilizadas para la conversión de bioetanol. Después se va a realizar una explicación más exhaustiva del maíz y del sorgo azucarero, pues su proceso de conversión a bioetanol es el que se va a analizar.

❖ Caña de azúcar

Se trata de un cultivo que requiere abundante agua, así como altas temperaturas. La planta no soporta temperaturas inferiores a 0°C, pero para un crecimiento adecuado la temperatura debe estar entre los 15°C y 40°C. La humedad también debe ser alta.

Brasil es el mayor productor de caña de azúcar del mundo, muy por encima de su principal competidor, India. Por ello, se trata de la principal materia prima para la producción de bioetanol en el país. El cultivo de caña de azúcar en España es residual, únicamente en la costa de Granada.

La gran ventaja de la caña de azúcar es que a pesar de tener una baja tasa de conversión a bioetanol (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), tiene un alto rendimiento agrícola. Además, una vez se realiza la molienda de la caña y se separa el jugo para su conversión a bioetanol, los restos (bagazo) son utilizados como combustible para la producción del bioetanol.

❖ Remolacha azucarera

La remolacha azucarera es una planta muy resistente al frío, apta para climas templados. Es importante la cantidad de luz que recibe la planta, ya que puede aumentar la cantidad de azúcar que tiene la planta.

La remolacha es un cultivo muy versátil, ya que puede producir azúcar para el consumo humano, pulpa para alimentación pecuaria y alcohol, tanto para consumo humano como para biocombustibles. Sin embargo, presenta un balance energético algo bajo.

El principal productor de remolacha es Rusia, aunque países de la UE como Francia o Alemania no se quedan muy atrás. También se utiliza mucho para la producción de bioetanol, en Francia por ejemplo, el 23% del bioetanol proviene de la remolacha [18].

❖ Trigo

El trigo es uno de los cereales más cultivados en el mundo. Puede darse en multitud de climas diferentes, aunque el ideal es templado. Soporta un rango de temperaturas desde los 3°C a los 30°C. No requiere grandes cantidades de agua, y la humedad relativa debe ser media.

La facilidad de cultivo y su disponibilidad lo convierten en una buena opción para la producción de bioetanol. En Francia, el 35% del bioetanol proviene del trigo. [18]

❖ Maíz

El maíz es el cereal más cultivado en el mundo. Puede ser cultivado en gran variedad de climas, aunque en climas cálidos el rendimiento es mayor. Requiere una temperatura en torno a los 25°C, y una incidencia de luz solar alta. En cuanto a las exigencias de riego, el maíz necesita mucha agua, aumentando su necesidad a medida que la planta madura.

El maíz es la principal fuente de bioetanol en la mayoría de los países, ya que las exigencias climatológicas son más fáciles de alcanzar. En Estados Unidos y en España es la materia prima principal, debido también a su bajo coste.

❖ Sorgo

El sorgo es uno de los cultivos más importantes del mundo, utilizado para consumo humano y para animales. Sin embargo, sus exigencias para cultivarlo son superiores al maíz. Necesita temperaturas altas (12°C para germinar y alrededor de los 30°C está su temperatura óptima), lo que lo convierten en un candidato ideal para países con climas semi-áridos. Además, no necesita tanta agua como otros cereales.

El gran inconveniente del sorgo es tanto su bajo rendimiento agrícola y su baja tasa de conversión a bioetanol. Estos inconvenientes, sin embargo, se ven o en cierta medida por la baja necesidad hídrica del cultivo y porque al igual que la caña de azúcar, el bagazo obtenido tras la separación del jugo se puede utilizar como combustible en la conversión a bioetanol.

❖ Residuos agrícolas y forestales

Los residuos agrícolas y forestales suponen una excelente fuente de bioetanol, ya que se normalmente son productos que antes no tenían utilidad y ahora pueden ser convertidos en bioetanol. Se trata por ejemplo de los tallos, cáscaras de fruta o incluso virutas de madera. El uso de estos residuos supone una gran ventaja, pues evita que la producción de biocombustibles no compita con la de alimentos.

❖ Comparación entre las distintas materias primas

Al tratarse principalmente de cultivos, el rendimiento varía según los países. El clima es un factor muy importante a tener en cuenta; en países con un clima tropical el cultivo de caña de azúcar para la producción de bioetanol es predominante, mientras que en países con un clima más seco como España o Estados Unidos principalmente se utiliza maíz. El rendimiento de conversión a etanol también varía según los países, ya que depende de la materia prima y del sistema de producción. Esto implica grandes

diferencias en las necesidades de tierra para la producción de etanol según el lugar y el tipo de cultivo, motivo por el cual se está fomentando el uso de biocombustibles producidos a partir de residuos agrícolas y forestales.

A continuación se muestra una tabla con las distintas características del rendimiento de algunas de las materias primas mencionadas anteriormente. Para su elaboración se han usado datos de la ONU (FAO) [19] para el rendimiento de conversión a etanol y datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación para el rendimiento agrícola de los cultivos en España.

	Rendimiento agrícola (t/ha)	Rendimiento etanol (l/t)	Rendimiento etanol (m ³ /ha)
Caña de azúcar	65	70	4.9
Remolacha azucarera	91.2	110	8.39
Trigo	2.7	430	1
Maíz	11.7	400	4.68
Sorgo	80	80	6.4

Tabla 5: Rendimiento agrícola y conversión a bioetanol a partir de distintas materias primas. Fuente: FAO, MAPA

3.2.1 EL MAÍZ

El maíz es una planta gramínea, originaria de Centroamérica hace unos 9.000 años. El maíz fue una de las bases de las culturas mesoamericanas, siendo su principal recurso agrícola y fuente de alimentación, además de un importante recurso comercial. Tras el descubrimiento europeo de América, el maíz se expandió muy rápidamente por el resto del mundo, pues puede crecer en ambientes muy diversos. Sin embargo, el papel del maíz en Europa fue secundario; siendo consumido únicamente como alimento por gente pobre o para forraje para el ganado. Tras la Revolución Industrial, aumentó el rendimiento de los cultivos de maíz, y con ello la superficie cultivada. Pero el maíz seguiría siendo usado como forraje para ganado, teniendo poca importancia en la alimentación humana. Actualmente, el maíz para consumo humano es procesado en fábricas para la elaboración de alimentación industrial. En la siguiente gráfica pueden verse los principales países productores de maíz del mundo, destacando Estados Unidos y China. [20]



Figura 3: Principales productores de maíz, 2019. Fuente: FAO

Pero el maíz que se cultivaba hace milenios tiene poco que ver con el actual. Los agricultores fueron seleccionando las mejores plantas en su búsqueda por un cultivo más eficiente. Se buscaba que las mazorcas tuvieran un mayor número de granos, y que esos granos fueran de mayor tamaño, así como una mayor resistencia a las inclemencias del tiempo. El maíz originario de hace más de 6.000 años tenía unos 12 granos por mazorca, y además el grano era duro, y no tenía por qué ser de color amarillo. Actualmente, una mazorca tiene más de 500 granos de maíz. [21]

Actualmente, con los avances en el campo de la genética ha surgido el maíz transgénico, que busca volver al cultivo inmune a ciertos elementos como los herbicidas. Sin embargo, los transgénicos tienen una gran polémica a su alrededor, ya que presentan riesgos medioambientales. Aunque el cultivo de transgénicos se permita en la Unión Europea desde 1998, 17 países de la UE, como Francia, principal productor de maíz de la Unión, han prohibido el cultivo de maíz transgénico por los riesgos que conlleva. En España el cultivo del maíz transgénico está relativamente extendido, y representa el 95% del cultivo de maíz transgénico en Europa. [22]

El maíz está formado por:

- Raíz. Las raíces son fasciculadas, y su misión es mantener la planta fija al suelo y erecta. Las raíces son superficiales, lo que convierten al maíz en un cultivo vulnerable a la sequía.
- Tallo. El tallo del maíz es largo, pudiendo alcanzar hasta los 4 metros de altura. No tiene ramificaciones ni entrenudos.
- Hojas. Las hojas del maíz son largas, con forma de lanza. Se encuentran abrazadas al tallo, y de ahí surgen las mazorcas.
- Inflorescencia. El maíz es una planta monoica (ambos sexos están presentes en la misma planta).
 - Inflorescencia masculina. Conocida como espiga o panoja, es terminal. Se trata de un eje central, sobre el que se distribuyen las espiguillas, que contienen el polen.
 - Inflorescencia femenina. Se trata de la mazorca del maíz
- Granos. Se encuentran en las mazorcas, y puede haber más de 500 granos por mazorca. Se distribuyen de forma lineal por la mazorca, formando hileras. El grano de maíz es la materia prima utilizada para la conversión a bioetanol, por su alto contenido de almidón. La calidad del grano de maíz está determinada por la constitución física del grano, ya que las diferentes partes del grano tienen una composición química muy diferente. A continuación se detallan las principales partes del grano de maíz. [23]
 - Pericarpio. Se trata de la parte externa del grano, constituyendo el 5-6% del peso total. Es resistente al agua y al vapor.
 - Endospermo. Es la parte mayoritaria del maíz, con un 80-82% del peso total. Se trata de la principal fuente de almidón, y la parte más importante para la conversión a bioetanol.
 - Germen. Representa alrededor del 10% del peso total del grano. Tiene un importante componente de grasas y proteínas, con mayor valor nutricional.
 - Pedicelo. El pedicelo es la parte del grano de maíz que lo une a la mazorca.

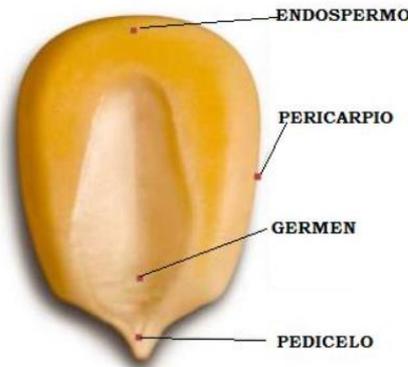


Figura 4: Partes del grano de maíz

El componente principal del grano de maíz es el almidón, con un porcentaje del 72-73% del peso total del grano. A continuación se detalla la composición química de las diferentes partes del grano de maíz.

Componente químico	Pericarpio	Endospermo	Germen
Proteínas	3,7	8,0	18,4
Grasas	1,0	0,8	33,2
Fibra	86,7	2,7	8,8
Cenizas	0,8	0,3	10,5
Almidón	7,3	87,6	8,3
Azúcar	0,3	0,6	10,8

Tabla 6: Composición de las partes del grano de maíz. Fuente: FAO

En cuanto al cultivo del maíz, se trata de una planta estival. En España, la siembra del maíz se realiza en abril o mayo, y la cosecha 5 meses después, en septiembre u octubre.

El maíz es un cultivo bastante exigente en cuanto al suelo se refiere, requiriendo suelos profundos y ricos en materia orgánica. Es muy importante también la capacidad de retención del agua, la aireación y la temperatura. Una buena capacidad de almacenamiento del agua asegura un suministro continuo de agua entre los riegos; una mala retención provocará que haya que regar más veces. En cuanto a la aireación, el maíz requiere suelos donde al menos el 10% sea aire. La temperatura es también un factor importante, sobre todo durante la

germinación donde se requieren al menos 12°C. El maíz soporta temperaturas mínimas de hasta 8°C, y máximas hasta los 30°C. [24]

El cultivo del maíz es, dentro de lo que cabe, relativamente sencillo. Primero de todo hay que preparar la tierra una vez se ha cosechado el anterior cultivo. Para ello se utiliza la grada de discos y un arado de vertedera, que remueve la tierra (el maíz requiere que al menos el 10% del suelo sea aire) y despeja el terreno de restos vegetales de la cosecha anterior. La siembra del maíz se recomienda realizarla en grupos y no en hileras, que es lo habitual en otros cereales como el trigo o la cebada. Se utiliza una sembradora monograno para realizar esta tarea. En cuanto al abonado, para el maíz se puede utilizar una abonadora de tipo centrífuga. También hace falta un pulverizador para el tratamiento de herbicidas e insecticidas, que se realiza solo una vez. Este tipo de maquinaria generalmente no es autopropulsada y necesita un tractor para funcionar. Para el análisis del caso se va a considerar un tractor de 120CV, considerado como el estándar. [25]

Para la recolección, el maíz utiliza una cosechadora de granos. Esta máquina es autopropulsada, y es mucho más compleja que las anteriores ya que realiza varias labores al mismo tiempo [25]:

- Siega del maíz. Esta tarea la realiza un cabezal que dispone de una cuchilla, que accionada por un rotor realiza la siega del maíz. Esta estructura cambia según el cultivo.
- Trilla del maíz. El maíz segado entra a un segundo bloque de trabajo, donde los granos de maíz son separados de la mazorca.
- Limpieza. En este último paso se limpia el grano, y se guarda en una tolva.



Figura 5: Cosechadora de granos

3.2.2 EL SORGO AZUCARERO

El sorgo es un género de poáceas, originarias de Etiopía hace 5.000 años. Gracias a su resistencia al calor y a la falta de humedad, el cultivo del sorgo se expandió rápidamente por todas las regiones templadas y tropicales de África y Asia, pero en Europa no tuvo un papel relevante. Actualmente el sorgo es muy cultivado en esas regiones, siendo la principal fuente de alimento de mucha gente en África Ecuatorial, India y China. [26]

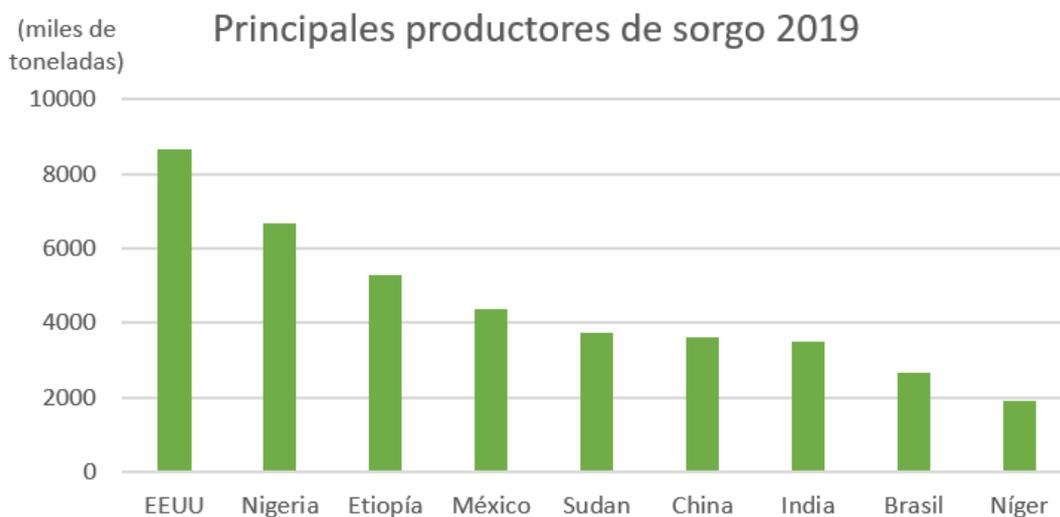


Figura 6: Principales productores de sorgo, 2019. Fuente: FAO

Igual que el maíz, el sorgo ha evolucionado mucho. Los primeros sorgos eran muy altos y difíciles de cosechar. Además maduraban muy tarde. Mediante la selección de las mejores plantas, se logró un cultivo resistente a enfermedades e insectos, convirtiéndose en un importante cultivo granífero.

El sorgo se puede clasificar en varios grupos principales: [26]

- Sorgo grano. Es el sorgo cultivado para la producción del grano. En África y la India se utiliza para consumo humano, mientras que en Estados Unidos se usa para alimentación animal.
- Sorgo dulce. En sus tallos se acumula azúcar, utilizado históricamente para jarabe. Tiene un ciclo de desarrollo más largo, por lo que forma más biomasa.
- Sorgo del Sudán, utilizado para forraje.

El sorgo está formado por: [26] [27]

- Raíces. Las raíces del sorgo son abundantes y largas, reunidas en un fascículo. Pueden alcanzar una profundidad de metro y medio, lo que las convierte en plantas resistentes a la falta de agua y humedad.
- Tallo. Normalmente tiene un solo tallo, largo y esponjoso. La altura del tallo se ve afectada por la latitud donde se cultive. Por ejemplo, en Grecia se han obtenido alturas de 4 metros, mientras que en Bélgica no se alcanzan los 2 metros. En el sorgo dulce, la concentración de azúcar puede alcanzar el 40% en masa seca del tallo.
- Hojas. Alternas y numerosas, con forma lanceolada.
- Inflorescencias. Situadas al final del tallo, contienen el grano del sorgo.
- Grano. El grano de sorgo es esférico, de unos 3mm de diámetro. Son 10 veces más pequeños que el grano de maíz.

El cultivo del sorgo requiere temperaturas más altas que el maíz. Para que se produzca la germinación, la temperatura del suelo debe ser de 18°C, por lo que su siembra se realiza más tarde que la del maíz. La temperatura óptima para el crecimiento de la planta debe ser superior a 25°C. Las exigencias del suelo son muy inferiores a las del maíz, pudiendo crecer en un amplio rango de suelos. El sorgo azucarero prefiere terrenos alcalinos, pues la presencia de carbonato cálcico en el suelo aumenta el contenido de azúcar en el tallo. El suelo debe ser profundo y bien aireado. El sorgo es mucho más resistente a la falta de agua que otros cultivos, pudiendo permanecer latente durante la sequía y retomar el crecimiento una vez vuelve el agua. El sorgo en zonas secas responde favorablemente a riego suplementario, aumentando su rendimiento. Las exigencias de agua son mayores tras la emergencia de la planta, siendo la etapa con más necesidades hídricas la floración. [26] [27]

La semilla de sorgo es 10 veces más ligera que la del maíz. Requiere un tratamiento previo de la tierra un poco más esmerado, ya que el cultivo del sorgo es más superficial. Se recomienda realizar un primer arado de la tierra con grada de discos, seguido de dos pases de cultivador. De este modo se airea la tierra y se limpia el terreno de malas hierbas y restos de la cosecha anterior. La semilla de sorgo, al ser más pequeña que la del maíz, no tiene tantas reservas y

debe ser depositada sobre suelo ya húmedo para que germine lo más rápido posible. La siembra es como la del trigo y se realiza en hileras, con una separación mayor a los 20 centímetros pero inferior a 60, ya que el rendimiento disminuiría. La maquinaria a utilizar es una sembradora a chorrillo. El abonado y aporte de herbicidas e insecticidas se realiza en dos ocasiones, por lo que son necesarios dos pases de cada máquina. Se utiliza para el abonado una abonadora de tipo centrífuga, y para los productos fitosanitarios un pulverizador. Esta maquinaria no es autopropulsada, y utiliza un tractor estándar de 120 CV. La recolección de los tallos del sorgo se realiza mediante una picadora-cargadora de forraje. Esta máquina siega el tallo y lo recoge. Después, unas cuchillas realizan el picado de los tallos, preparando la cosecha para su almacenamiento y posterior transporte a la planta de producción de bioetanol. Esta máquina es autopropulsada. [25] [27]



Figura 7: Picadora cosechadora

El principal inconveniente del cultivo de sorgo para la producción de bioetanol es la estacionalidad del sorgo. El período entre que se realiza la cosecha y se transforma en bioetanol debe ser muy corto, ya que el azúcar se degrada rápidamente. Esto implica que no se pueden almacenar los tallos durante un largo periodo de tiempo, por lo que la planta (si utilizara únicamente el sorgo) estaría parada una gran parte del año. Se está intentando desarrollar métodos para el almacenamiento del jugo del sorgo, o también utilizar la planta conjuntamente con otros tipos de materias primas con alto contenido en sacarosa, como la remolacha o la caña de azúcar. No obstante, el hecho de que la planta del sorgo pueda utilizarse completamente para la producción del bioetanol, lo convierten en una opción muy atractiva para el sector. [26]

3.3 PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Dependiendo del origen de la biomasa, el etanol se separa en 4 clases, etanol de primera, segunda, tercera o cuarta generación. Aunque su origen sea diferente, el producto resultante es el mismo, alcohol etílico.

3.3.1 PRIMERA GENERACIÓN

El etanol de primera generación es obtenido a partir de productos agrícolas con valor alimenticio. Gran parte de la producción de bioetanol del mundo es de este tipo, aunque actualmente se está intentando disminuir esta tendencia. Como proviene de cultivos con valor alimenticio, entran en conflicto. Típicamente necesitan una buena calidad de suelo, por lo que pueden entrar en conflicto, aumentando los precios de los alimentos.

Es importante distinguir el etanol procedente de materia prima con alto contenido en sacarosa y alto contenido en almidón, pues los procesos son diferentes. En la siguiente figura se muestra el proceso de producción de bioetanol de primera generación según su materia prima.

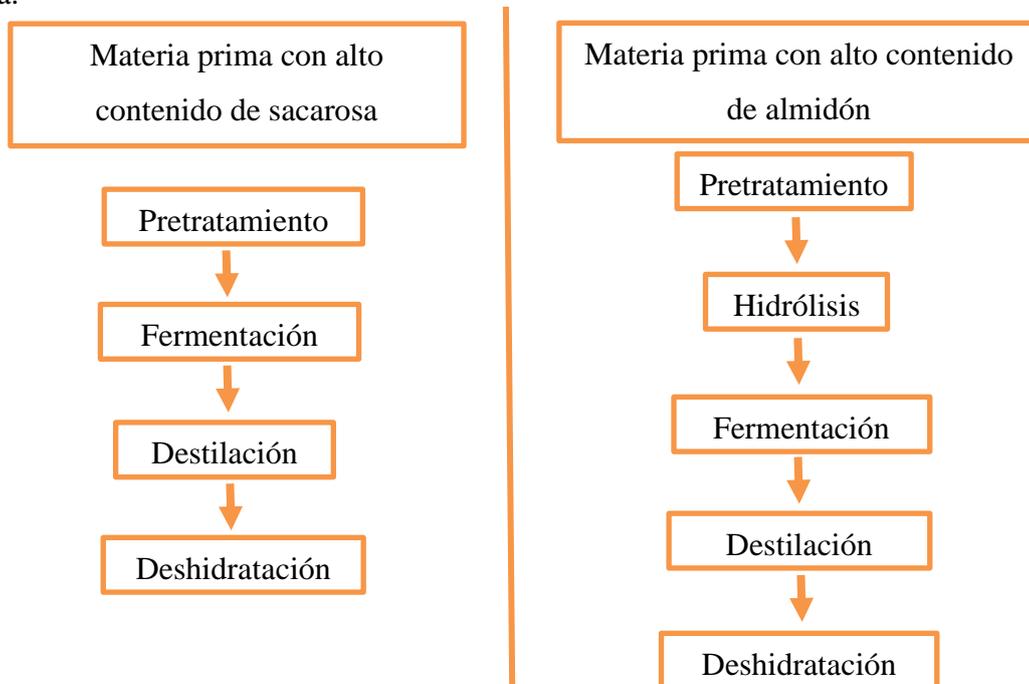


Figura 8: Producción de bioetanol de 1ª generación según su materia prima

La gran diferencia entre ambos procesos es que en el caso del almidón es necesario convertirlo en glucosa para poder obtener bioetanol. Este proceso es la hidrólisis del almidón, que consiste en la licuefacción y la sacarificación.

A continuación se va a describir las fases de producción de bioetanol. [17]

Pretratamiento

Se trata de distintos procesos realizados a la materia prima con el fin de aumentar la eficiencia de la conversión a etanol. Actualmente se utilizan métodos físicos, químicos, biológicos y físico-químicos. Entre los métodos químicos se encuentra la ozonólisis, la hidrólisis ácida y la hidrólisis alcalina. Los tratamientos biológicos se basan en utilizar hongos [28]. Pero de todos estos pretratamientos el más importante es el físico.

El pretratamiento físico es la molienda de la materia prima. Es importante distinguir la molienda seca y la molienda húmeda, pues se obtienen rendimientos y productos diferentes: [29]

- Molienda seca. Comienza con la limpieza del grano, que a tras pasar por unos molinos es convertido en harina. Mediante un molino de martillos, el maíz es molido lo más fino posible. El tamaño de los fragmentos del maíz afecta al rendimiento, y un menor tamaño aumenta el ratio de conversión a etanol. Para ello, el molino de martillos está equipado con una rejilla de retención, *Figura 9*, que no permite el paso a fragmentos con un diámetro superior a los 3 milímetros.

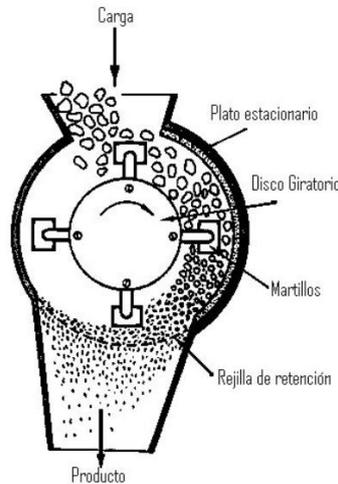


Figura 9: Molino de martillos

- Molienda húmeda. Es más complejo porque hay que separar el grano de todos sus componentes, aislando el almidón. Su coste es mayor y se consume mucha agua, pero se obtiene más etanol. Además, los subproductos obtenidos tienen mayor valor. El proceso es el siguiente:
 - Primero se limpia el maíz, eliminando granos rotos y restos indeseados.
 - Los granos de maíz una vez limpios son remojados durante 35-50 horas a una temperatura de 50°C con agua, un pequeño porcentaje de ácido sulfúrico y ácido láctico.
 - Tras el remojo, se realiza la molienda de la mezcla, obteniéndose varios productos, como el germen y el almidón que posteriormente será tratado y convertido en etanol.

En el caso de la caña de azúcar o el sorgo azucarero, en vez de obtener harina tras la molienda, se obtiene el jugo.

Hidrólisis

Esta fase es exclusiva de la materia prima con alto contenido en almidón, ya que es necesario transformarlo en glucosa para poder obtener bioetanol. En esta fase, el

almidón reacciona con agua y enzimas para descomponer el almidón en azúcar. Se realiza en varias fases [29]:

- Pre-mezcla. Se añade agua al maíz molido, junto con una pequeña cantidad de α -amilasa. Se eleva la temperatura de la mezcla a unos 40-60°C durante unos pocos minutos.
- Cocción. En esta segunda fase, se eleva la temperatura de la mezcla a 90-165°C durante al menos 30 minutos.
- Licuefacción. A la mezcla se le añade otra pequeña cantidad de α -amilasa. La mezcla se mantiene a una temperatura de 60°C. Mediante la adición de otros químicos, se mantiene la mezcla con un pH del orden de 7, ya que así la enzima actúa con la mayor eficiencia posible.
- Sacarificación. La mezcla se transporta a otro tanque, y se le añade una enzima secundaria, la gucoamilosa y cierta cantidad de ácido sulfúrico para controlar el pH. A una temperatura de 30°C, el almidón licuado es transformado en azúcares fermentales. Una vez realizada la sacarificación, el proceso es igual que el de la materia prima con alto contenido en sacarosa.

Tradicionalmente la hidrólisis se realizaba mediante ácidos, pero su mayor complejidad a la hora de reciclar esos ácidos aumentaba el coste de producción significativamente, por lo que se ha terminado utilizando las enzimas.

Fermentación

La fermentación alcohólica es un proceso biológico en el que se realiza la fermentación anaeróbica de los azúcares, es decir, sin oxígeno. Microorganismos convierten la sacarosa en etanol y en CO₂, además de calor.



La conversión estequiometría de la fórmula anterior indica que con 1 gramo de glucosa se obtienen aproximadamente 0.51g de etanol y 0.49g de CO₂. Sin embargo,

el rendimiento es inferior, pues los microorganismos utilizan un pequeño porcentaje de glucosa para producir nuevas células, o como parte de su metabolismo. El 95% de los azúcares se transforman en etanol, el 4% en glicerol y el 1% restante en materia celular de las levaduras. La fermentación se realiza a una temperatura en torno a los 30°C, con una duración entre los 2 y los 3 días. [29]

Los microorganismos más utilizados para la fermentación alcohólica del azúcar son las levaduras. *Saccharomyces cerevisiae* es la levadura más utilizada, ya que produce etanol con un rendimiento cercano al máximo teórico. [28]

Destilación

Tras la fermentación, la concentración del etanol es baja (en torno al 10%), y es necesario separar el alcohol de los sólidos y del agua. Esto se logra mediante la destilación. La temperatura de ebullición del alcohol es 78°C, y la del agua 100°C. Gracias a esta diferencia de temperaturas, es posible separar ambas mezclas, con una pureza del 95%.

Deshidratación

Tras la destilación, aparece un azeótropo de agua-etanol, que limita la pureza del etanol al 95%. Un azeótropo se comporta como si fuera un compuesto puro; la temperatura de ebullición es la misma para los dos compuestos de la mezcla, de modo que al producirse la evaporación se obtiene la misma composición en el compuesto líquido y el gaseoso. El proceso de deshidratación es por tanto necesario para desplazar el punto azeotrópico, y conseguir que el etanol sea lo más puro posible.

Se puede realizar de las siguientes formas [30]:

- Destilación azeotrópica. Mediante la adición de un agente de separación se modifica el punto de azeotrópico. El agente de separación crea dos fases líquidas que separan las mezclas azeotrópicas. Los agentes utilizados normalmente son el ciclohexano, el pentano y el benceno, aunque este último cada vez se utiliza menos.

- Destilación extractiva. Se realiza mediante un solvente con alto punto de ebullición, completamente solvente en la mezcla azeotrópica, Este solvente altera las volatilidades relativas de la mezcla, permitiendo que la nueva mezcla se separe por destilación normal.
- Destilación mediante tamices moleculares. Los tamices moleculares son sustancias porosas que pueden ser naturales o artificiales. Estos materiales tienen una gran capacidad de retención de sustancias químicas. En el caso de la destilación del etanol, el etanol atraviesa el tamiz y el agua no, quedando la mezcla separada.

Desnaturalización

Tras la deshidratación, al etanol obtenido se le agrega un pequeño porcentaje de algún producto que haga que no sea apto para el consumo humano.

El etanol de primera generación se lleva produciendo a escala industrial desde los años 70, y los avances se encuentran orientados a la optimización del uso de la materia prima y los subproductos obtenidos. Uno de estos subproductos es el bagazo, obtenido tras la molienda de la caña de azúcar. Con alto valor nutricional, este subproducto típicamente se utiliza como alimento para animales, aunque el desarrollo de nuevas tecnologías (el etanol de segunda generación) permite convertir este residuo en etanol. También se puede utilizar como combustible para generar tanto el calor como la electricidad necesarias para todo el proceso de transformación de la materia prima a etanol.

El bioetanol producido con alto contenido en almidón también produce subproductos, como los granos de destilería (DDGS), utilizado como suplemento alimenticio para animales. En el caso del maíz, tras la molienda húmeda también se obtiene aceite de maíz, que puede ser utilizado también para la alimentación animal o para la producción de biodiesel. [31]

3.3.2 SEGUNDA GENERACIÓN

El bioetanol de segunda generación es obtenido a partir de residuos forestales y agrícolas. También se pueden utilizar residuos de la primera generación del etanol, como el bagazo. Se estima que se obtienen 270 kg de bagazo por cada tonelada de caña de azúcar que es procesada, por lo que el potencial del bioetanol de segunda generación es enorme. De hecho, la producción de bioetanol de segunda generación está actualmente siendo muy estudiada, ya que podría presentar una huella negativa de CO₂. [17]

Para el etanol de segunda generación se pueden utilizar cultivos celulósicos, como plantas leñosas o pastos. Estos cultivos pueden generar más biomasa útil por metro cuadrado que los cultivos de almidón o sacarosa, ya que se podría utilizar la planta entera. Además, la calidad del suelo requerida para este tipo de cultivos puede ser pobre, por lo que no entraría en conflicto con los cultivos destinados a la generación de alimentos.

La materia prima de segunda generación principalmente está compuesta de celulosa y lignina, unas sustancias mucho más complejas de transformar en etanol que el almidón o la sacarosa. [32]

- Celulosa. Es un biopolímero, compuesto de dos subunidades de β -D-glucosa, unidas mediante β -1,4-O-glucosídico.
- Hemicelulosa. Es un carbohidrato complejo, formado por diferentes polímeros (pentosas, hexosas, azúcar y ácidos). La hemicelulosa es el nexo de unión entre la lignina y la celulosa.
- Lignina. Es un polímero amorfo y tridimensional, que cambia según la fuente de la biomasa.

El coste de convertir biomasa lignocelulósica en etanol es mucho mayor, sin embargo se compensa con el bajo precio de la materia prima, que además es un subproducto por lo que el impacto ambiental es mucho menor. Para convertir la celulosa en etanol es necesario descomponer la celulosa y la hemicelulosa en azúcar, y luego realizar la fermentación.

A continuación se muestra el proceso de producción de bioetanol a partir de materia lignocelulósica: [32]

- Pretratamiento. Igual que para los biocombustibles de primera generación, esta fase es indispensable para la producción de bioetanol. La lignina forma unas barreras en las paredes celulares, lo que dificulta el trabajo de las enzimas. El pretratamiento busca reducir ese contenido en lignina, y aumentar al área superficial.
 - Pretratamiento mecánico.
 - Trituración mecánica. Consiste en la molienda de la materia prima, reduciendo el tamaño de las partículas. Esto supone un aumento de la superficie, aumentando el rendimiento de la hidrólisis. El alto coste energético supone que el pretratamiento no sea el más viable.
 - Ultrasonidos. Mediante esta técnica se puede extraer la lignina y la hemicelulosa, aunque su efecto en la biomasa es muy superficial.
 - Pretratamiento térmico.
 - Explosión de vapor. Se aumenta la temperatura de la materia prima a unos 200°C mediante vapor saturado durante unos pocos minutos. A continuación, se lleva el producto a presión atmosférica, obteniéndose una celulosa más accesible a la hidrólisis. En este proceso se produce ruptura de fibras y enlaces, así como una despolimerización.
 - Agua caliente a alta temperatura. Mediante agua caliente a presión a unos 200°C, se solubiliza la hemicelulosa para evitar inhibidores. Si se mantiene el pH entre 4 y 7 se reduce la formación de monosacáridos e inhibidores.
 - Pretratamiento físico-químico
 - Explosión de fibra de amoníaco. Este tratamiento tiene una duración de 10 a 60 días, a temperaturas en torno a 120°C. Se utiliza amoníaco, utilizando el mismo peso que biomasa haya, aumentando el rendimiento de conversión a bioetanol en 2.5 veces.

- Explosión con CO₂. A alta presión y temperaturas en torno a los 200°C, se aplica CO₂ a la materia prima. El tratamiento produce ácidos que hidrolizan la hemicelulosa. Es más económico que la explosión con amoníaco, pero su rendimiento es mucho menor.
- Pretratamiento químico.
 - Hidrólisis ácida. Catalizadores ácidos transforman la hemicelulosa y la celulosa en sus monómeros elementales. Se utilizan varias clases de ácidos, como ácido sulfúrico, sulfuroso, clorhídrico, fosfórico, nítrico y fórmico. Produce aumento del rendimiento que pueden ser superiores al 90%, pero requieren una gran cantidad de ácido.
 - Tratamientos con ozono. Se utiliza ozono para eliminar completamente la lignina, sin producir productos inhibidores. Pero su coste es alto.
 - Hidrólisis con álcalis. La biomasa se sumerge en sosa cáustica diluida, a 60°C durante un día. La biomasa se inflama y aumenta el área superficial, facilitando la labor de las enzimas. Además, la estructura de la lignina se rompe. Sin embargo, este tratamiento requiere que el contenido máximo de la lignina sea del 18%.
 - Oxidación húmeda. Se añade un compuesto oxidante a la biomasa sumergida en agua. Se pierde una gran cantidad de azúcar, y se forman compuestos solubles de lignina, por lo que este tratamiento no es muy efectivo para la obtención de bioetanol.
 - Tratamiento con solventes orgánicos. Se mezcla un compuesto orgánico con un ácido inorgánico, que rompe el interior de la lignina y los puentes de hemicelulosa. Se produce también la hidrólisis casi total de la hemicelulosa.
- Pretratamiento biológico
 - Tratamiento con hongos. Mediante hongos, se degrada la lignina y la hemicelulosa. Apenas requiere energía, pero su lentitud hace que este pretratamiento no sea el ideal.

- Tratamiento con bio-solventes orgánicos. Se utilizan solventes orgánicos y hongos, que producen la hidrólisis de la celulosa y la descomposición de la lignina.
 - Hidrólisis enzimática. En esta fase, enzimas degradan la celulosa, convirtiéndola en glucosa.
 - Decodificación. Esta fase sirve para eliminar sustancias no deseadas obtenidas tras el pretratamiento y la hidrólisis enzimática, que podrían dificultar el proceso de fermentación.
 - Métodos biológicos. Microorganismos y enzimas actúan sobre las sustancias no deseadas cambiando su composición. Estos métodos son baratos y su impacto ambiental es relativamente bajo.
 - Métodos físico químicos. Existen muchos métodos, siendo los más importantes:
 - Overliming. Se realiza con hidróxido de calcio.
 - Neutralización con hidróxidos. Mediante su uso, se forman precipitados con sales de calcio, que son retirados.
 - Extracción. Se realiza mediante solventes orgánicos.
- Estos métodos son muy eficaces, y además no son caros.
- Fermentación. Levaduras convierten el azúcar en alcohol, produciendo además CO₂. Para los materiales lignocelulósicos se produce la fermentación de hexosas y pentosas.

El Real Decreto 1085/2015 establecía que para el año 2020, el bioetanol de primera generación debía suponer únicamente el 7% del total de combustibles. El objetivo de esta medida no es limitar la producción de bioetanol, sino fomentar el etanol de segunda generación, ya que así el cultivo destinado a la producción de combustibles no entra conflicto con el destinado a la alimentación. En España actualmente sólo existe una planta de etanol de segunda generación situada en Alcázar de San Juan, con una capacidad nominal de 33.000 toneladas de bioetanol, o unos 42.000 m³. Esta planta puede utilizar residuos de la producción de vino para convertirlos en bioetanol.

3.3.3 TERCERA GENERACIÓN

La producción de bioetanol de tercera generación está basada en biomasa de rápida generación y alta densidad energética, como las micro y macro algas. Se trata de especies no alimenticias. Las micro algas no serían utilizadas para producir bioetanol, sino biodiesel, además de productoras de hidrógeno. De las macro algas en cambio, se pueden extraer almidones, que tras ser hidrolizados y fermentados se transforman en etanol.

Los biocombustibles de tercera generación están basados en el cultivo de algas o microorganismos unicelulares como las cianobacterias. Las microalgas son capaces de generar grandes cantidades de biomasa utilizando desechos procedentes de la industria, como CO₂, o incluso agua residual.

Algunos tipos de microalgas son incluso capaces de producir biocombustibles. Las algas tienen un alto contenido en lípidos y carbohidratos, que pueden ser extraídos para convertirlos en combustibles, además de poder utilizar luego la biomasa para convertirla en bioetanol o biogás. Se pueden extraer almidones, que tras ser hidrolizados y fermentados se transforman en etanol. Pero es necesario la optimización de ciertas tecnologías, como la extracción del aceite de las algas, ya que el cultivo de algas no supone ningún reto. [33]

La obtención de bioetanol de tercera generación es puramente experimental. La empresa estadounidense Algenol utiliza algas, luz solar y CO₂ para producir bioetanol mediante cianobacterias modificadas genéticamente.

3.3.4 CUARTA GENERACIÓN

Por último se encuentran los biocombustibles de cuarta generación. Mediante bioingeniería, se busca utilizar organismos modificados genéticamente para captar y almacenar el dióxido de carbono, así como mejorar la eficiencia del proceso de conversión a etanol. Levaduras modificadas genéticamente podrían aumentar también el rendimiento de conversión al etanol, al realizar la hidrólisis y la fermentación del almidón al mismo tiempo. [17]

3.4 CONSUMO DEL BIOETANOL

3.4.1 BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE

Un motor de gasolina tradicional no está capacitado para trabajar con cantidades de etanol superiores al 15%, pudiendo causar que el motor se estropee. Para utilizar el bioetanol como combustible en los vehículos es necesario realizar una serie de modificaciones para adaptarlo, principalmente los inyectores y el sistema de combustión.

Los vehículos FFV pueden trabajar incluso con E100. Típicamente estos vehículos funcionan con E85, que contiene un 15% de gasolina y un 85% de bioetanol. Sin embargo, necesitan también un pequeño depósito auxiliar de gasolina, para el arranque del motor cuando hay temperaturas bajas. Este tipo de mezclas son conocidas como gasohol, oalconafta.

El gran inconveniente de este combustible es su poder calorífico, inferior al de la gasolina. Se reduce por tanto la autonomía del vehículo. En cambio, el octanaje es más elevado que el de la gasolina, garantizando un uso más eficiente del combustible.

3.4.2 MEZCLA DE BIOETANOL Y GASOLINA

El bioetanol es usado también mezclado con la gasolina en proporciones más pequeñas. Este tipo de mezclas son utilizadas ampliamente en casi todos los países del mundo. Según la Agencia Europea del Medioambiente, en su informe de 2016 [34], el 75% de la gasolina vendida en la Unión era E5, el 9.5% era E10 y el resto no contenía etanol.

Mezclas con mayor contenido de etanol son muy habituales en otros países, como E15, E20 y E25. En Brasil por ejemplo, el contenido mínimo de bioetanol es del 27%, estando prohibidas mezclas con menor contenido de etanol [35].

El uso de estas mezclas, aunque reduzca la autonomía del vehículo, reduce también las emisiones de gases de efecto invernadero. Cambiar de E5 a E10 puede reducir la emisión de NO_x en un 34%, las partículas en un 90% y los hidrocarburos un 60%. [36]

3.4.3 BIOETANOL COMO ADITIVO

El etil-tert-butil éter (ETBE) es un compuesto obtenido por reacción catalítica de etanol (47%) e isobutileno (53%) [37]. Producido a partir de bioetanol y del gas natural, sus propiedades lo convierten en un componente muy útil para la mezcla con gasolina, permitiendo a las refinerías alcanzar sus objetivos de octanaje y conseguir además un biocombustible. Algunas de estas propiedades son:

- Octanaje alto.
- Bajo punto de ebullición
- Baja presión del vapor.
- Baja afinidad al agua.
- Alto poder calorífico.

Comparado con el bioetanol puro, el ETBE presenta ventajas como una mayor eficiencia térmica y ser menos corrosivo. Pero la gran desventaja es que además de necesitar un proceso extra para obtenerlo, también necesita isobutileno, subproducto de las refinerías. Para la obtención del ETBE se tiene que producir una catálisis ácida entre el bioetanol y el isobutileno. Se realiza en tres etapas:

- Reacción isoterma y reacción adiabática. Mediante dos reactores se sintetiza el ETBE. Se utilizan dos reactores para maximizar el rendimiento de la operación.
- Destilación. El producto obtenido de los reactores es purificado, obteniéndose el producto final, el ETBE.
- Recuperación. Mediante una columna de extracción, se recupera el isobuteno que ha sobrado tras la reacción, pudiendo reutilizarse en el proceso.

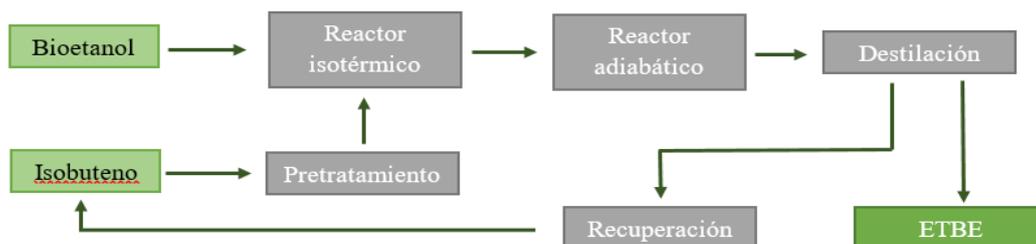


Figura 10: Esquema producción ETBE

3.5 SITUACIÓN DEL BIOETANOL EN ESPAÑA

A continuación se va a describir la situación actual del bioetanol en España, desde la producción de la materia prima a su consumo, pasando por su producción. También se van a explicar algunos proyectos que se están desarrollando en el país con relación al bioetanol.

3.5.1 MATERIA PRIMA USADA EN ESPAÑA

La materia prima por excelencia en España es el maíz, con un 93.6% del total en el año 2019. Este porcentaje ha ido aumentando a lo largo de los años a costa de la caña de azúcar. En 2015, el 74.18% del bioetanol procedía del maíz, mientras que el 18.61% procedía de la caña de azúcar. En 2019, la caña de azúcar había disminuido hasta el 1.08%.

	2015	2016	2017	2018	2019
Alcohol vinílico	1,21	0,4			
Bagazo*					0,67
Caña de azúcar	18,61	6,44	0,87	0,39	1,08
Centeno		0,09			
FFBs					
Lías de vino*					0,09
Maíz	74,18	85,65	89,44	92,61	93,6
Orujos de uva*					2,88
Remolacha	3,41	1,89	4,63	1,64	1,18
Semilla trigo	1,99	5,53	5,06	5,14	0,59
Triticale	0,6				

*Materias primas para etanol de segunda generación

Tabla 7: Materia prima utilizada en España, de 2015 a 2019. Fuente: CNMC

Sin embargo, únicamente 21.02% de la materia prima consumida en España en 2019 fue producida en nuestro país. La mayor parte procedía de los países del este de Europa; Rumania y Ucrania. En la siguiente figura puede verse los principales países de los que España importa materia prima desde el año 2015.

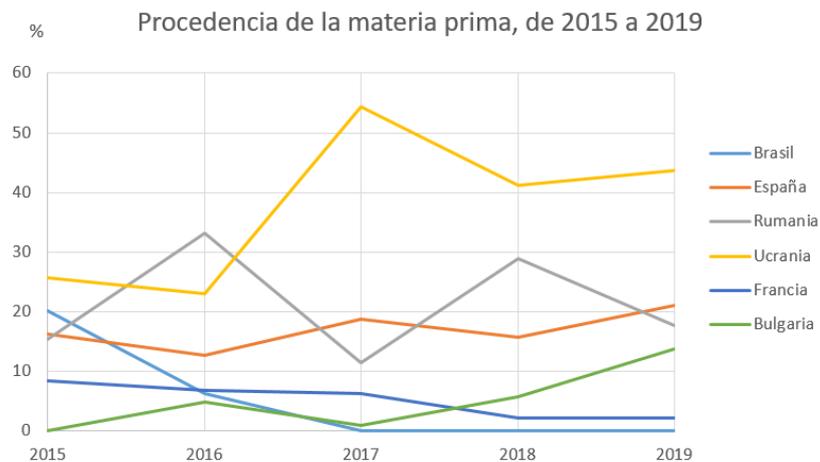


Figura 11: Procedencia de la materia prima para bioetanol. Fuente: CNMC

Como consecuencia de la bajada de la utilización de la caña de azúcar, Brasil no suministra materia prima desde hace unos años. En cambio, el aumento de la demanda de maíz ha hecho que Ucrania se convierta en el principal país del que España importa materia prima, superando incluso el 50% de la materia prima consumida en España en el año 2017.

En cuanto a la producción de maíz en España, en el año 2019 se recogieron 4.185 miles de toneladas de maíz. La producción respecto los años anteriores aumentó, aunque en el año 2013 se alcanzó un máximo de 4.930 miles de toneladas de maíz (Figura 12).

En España, aproximadamente 17 millones de hectáreas están destinadas al sector agrario. De esos 17 millones, únicamente 359.189 hectáreas están destinadas al cultivo del maíz. En comparación, otros cereales como el trigo utilizan 2 millones de hectáreas, o la cebada con 2.8 millones de hectáreas. A pesar de la enorme diferencia de utilización de suelos, la cantidad de grano recogida de los tres tipos de cultivo era del mismo orden de magnitud; 4.2 millones de toneladas de maíz, 5.8 millones de toneladas de trigo y 7.4 millones de toneladas de cebada. [38]

La caña de azúcar o el sorgo, muy utilizados en otros países, en España apenas se cultivan. El sorgo por ejemplo, únicamente ocupa 6.560 hectáreas, mientras que la caña de azúcar sólo utiliza 45 hectáreas (en Canarias y Andalucía únicamente). La remolacha azucarera en

cambio utiliza 34.509 hectáreas, aunque tampoco se utiliza para convertirlo en bioetanol. [38]

Debido a las exigencias climáticas de la caña de azúcar, su cultivo a gran escala no es viable en España, lo que lo convierte en una mala fuente de bioetanol en el país. El sorgo azucarero en cambio es una alternativa viable, ya que las características climáticas son las adecuadas para este cultivo.

3.5.1.1 Cultivo del maíz en España

En cuanto a la producción de maíz en España, en el año 2019 se recogieron 4.185 miles de toneladas de maíz. La producción respecto los años anteriores aumentó, aunque en el año 2013 se alcanzó un máximo de 4.930 miles de toneladas de maíz. En la siguiente figura se puede ver como la producción de maíz ha ido aumentando desde los años 60, que son los datos más antiguos disponibles según la FAO.

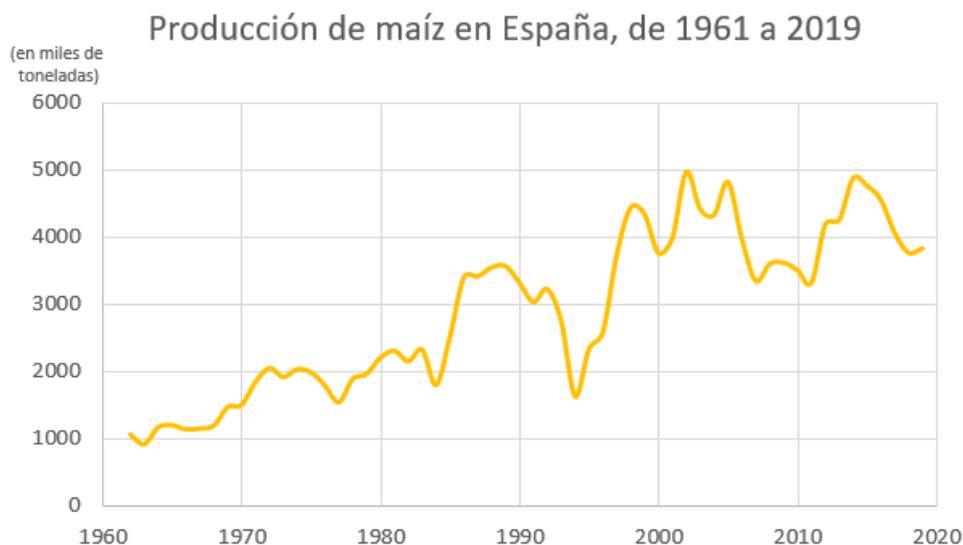


Figura 12: Producción de maíz en España, de 1961 a 2019

En el año 2019, en España se cultivaron un total de 359.189 hectáreas de maíz, de las cuales 340.604 ha eran de regadío. 15.483 hectáreas de secano se encuentran en Galicia, con una producción total aproximada de 88.000 toneladas de maíz. El resto del maíz de regadío se encuentra distribuido por el resto del país, con un número muy pequeño de hectáreas. La

eficiencia de estos cultivos de secano es de 5.7 t/ha, un número muy inferior a la media. Al ser cultivos de secano, si los meses de Julio y Agosto son secos el rendimiento disminuye considerablemente. Por ello, los cultivos de regadío están demostrando ser más eficientes incluso en Galicia, dónde se ha demostrado que el regadío aumenta no solo el rendimiento del cultivo, sino también el contenido en almidón de la planta. [39]

Las provincias de Huesca y León fueron las provincias con mayor superficie destinada al maíz (19.8% y 19.3% del total). Como puede verse en la siguiente figura, casi todo el cultivo del maíz en España está concentrado alrededor de estas provincias.

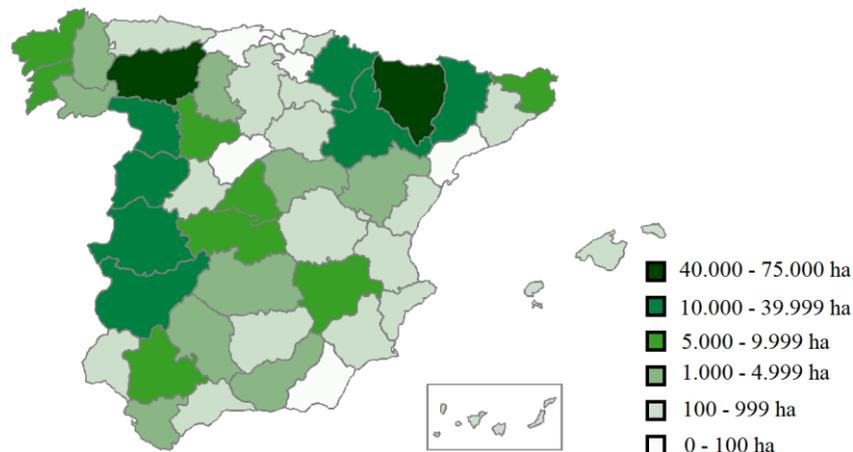


Figura 13: Hectáreas destinadas al cultivo del maíz por provincias en 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de MAPA

El maíz es un cultivo exigente en agua, por lo que la disponibilidad es de vital importancia. Por ello, no resulta extraño que las regiones con mayor rendimiento sean aquellas que tienen un mayor número de embalses (Figura 14). Por ejemplo, Extremadura es la comunidad con un mayor rendimiento, 14.6 t/ha. La comunidad extremeña se encuentra en plena cuenca hidrográfica del Guadiana y del Tajo, con un gran número de embalses a su disposición.

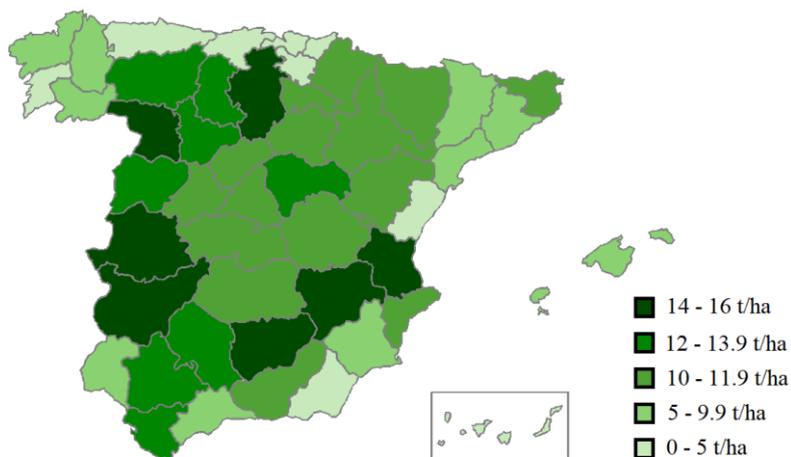


Figura 14: Rendimiento del maíz por provincias en 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de MAPA

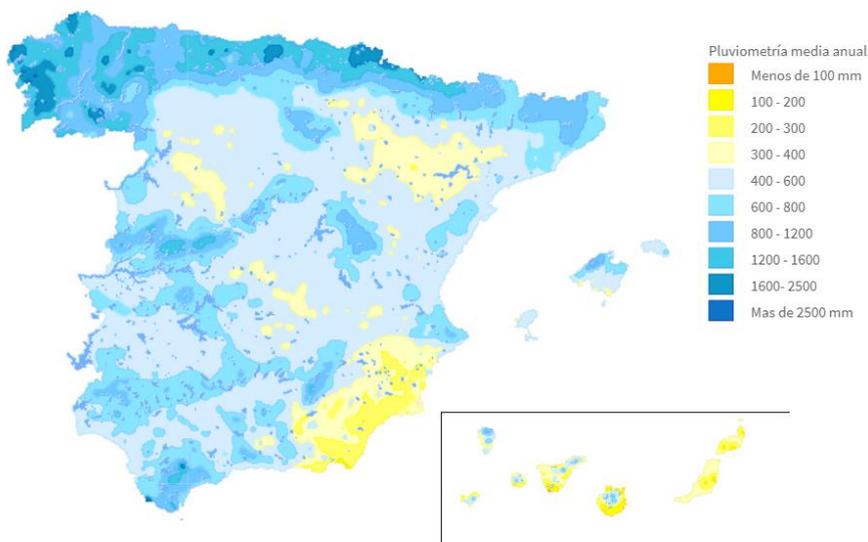


Figura 15: Pluviometría anual y embalses en 2019. Fuente: SIGA

3.5.1.2 Cultivo del sorgo en España

El cultivo de sorgo en España está muy poco extendido, con únicamente 6.560 hectáreas en 2019, de las cuales 3.759 ha son de regadío. Se recogieron en total 25.700 toneladas de grano de sorgo. En la figura a continuación se muestra la evolución del cultivo del sorgo en España. Ha disminuido radicalmente en España desde los años 70, cuando se recogían más de 150.000 toneladas de sorgo, con casi 300.000 toneladas en 1978 y 54.000 hectáreas destinadas a su cultivo, según la FAO.



Figura 16: Producción de sorgo en España. de 1961 a 2019.

Actualmente, más de la mitad de la superficie destinada al sorgo está en Andalucía, con una superficie total de 3.628 hectáreas (casi toda la superficie está en Cádiz). Cataluña ocupa la segunda posición, con 1.267 hectáreas, seguida por Aragón, con 1.015 ha. En el siguiente mapa se muestra la superficie destinada al cultivo del sorgo por provincias. [38]

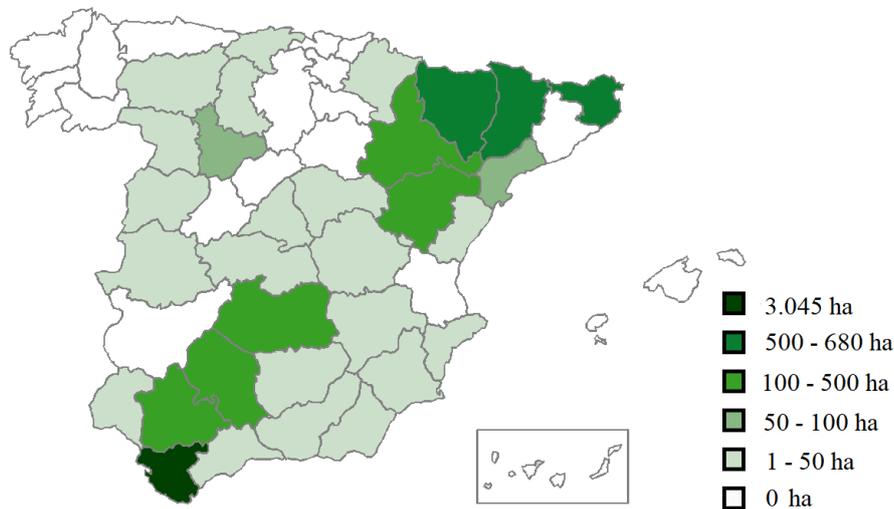


Figura 17: Producción de sorgo por provincias, 2019.

Fuente: Elaboración propia con datos de MAPA

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) ofrece únicamente los datos de rendimiento de grano de sorgo, y no el rendimiento del tallo, que es lo realmente importante en la producción del bioetanol. Se estima que alrededor del 80-85% de la biomasa área corresponde a los tallos, mientras que el 15-20% restante corresponde a las hojas y a inflorescencias. [26]

Según el MAPA, en España se obtuvo un rendimiento de 3.8 toneladas de sorgo por hectárea cultivada. Suponiendo que los tallos representan el 85%, y que la cantidad de hojas y granos es la misma (7.5% cada una), se obtendría un rendimiento de unas 50 toneladas de tallos de sorgos por hectárea.

3.5.2 PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Sobre la producción de bioetanol en España, se alcanzó un máximo histórico en el año 2019, con una producción de 548.273 m³ de bioetanol. Aproximadamente la mitad de ese bioetanol fue exportado a otros países, mientras que apenas se importaron 1600 m³. En la *Figura 18* se puede ver como ha ido disminuyendo la importación de bioetanol en España, mientras que la exportación tiende a aumentar. La producción nacional sin embargo se encuentra estancada, ya que España solo cuenta con 4 plantas de producción de bioetanol desde el año 2006, con una capacidad nominal de producción de 587 m³ de bioetanol.

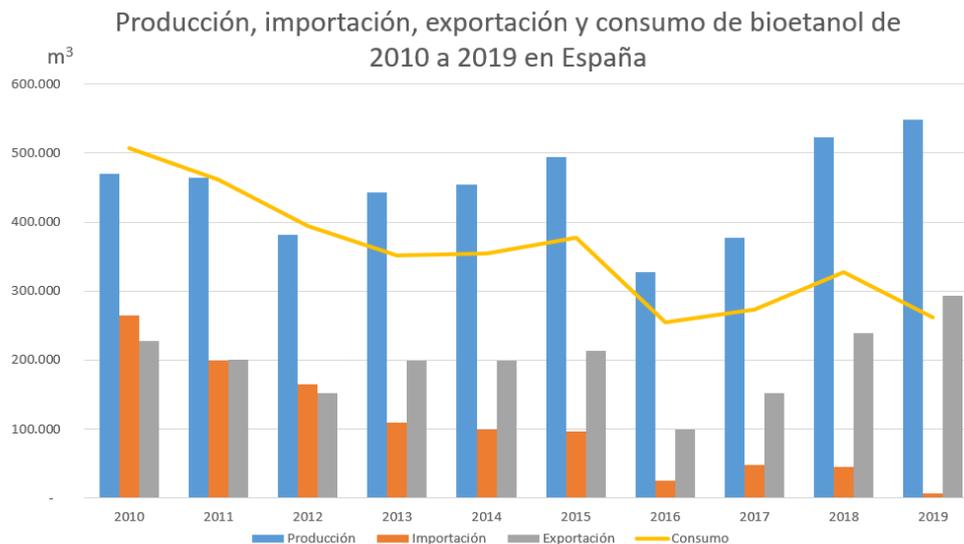


Figura 18: Producción, importación, exportación y consumo de bioetanol en España, de 2010 a 2019.

Fuente CNMC

Las plantas que actualmente están en funcionamiento en España son:

- Ecocarburantes Españoles S.A., situada en Cartagena. La planta es propiedad de la empresa Vertex Bioenergy, propietaria también de otras dos plantas de bioetanol en España. Esta planta tiene una capacidad de producción de 150.000 m³ de bioetanol. La planta opera con cereales, principalmente el maíz. Como resultado de la producción del etanol, la planta genera también 110.000 toneladas de granos secos de destilería (DDGS) que son utilizados como pienso para animales. Además, debido

a la cogeneración, la planta produce 175.000 MWh de electricidad, que son vertidos a la red.

- Bioetanol Galicia, situada en Teixeiro-Curtis (La Coruña). La planta es también propiedad de Vertex Bioenergy. Tiene una capacidad nominal de 195.000 m³ de bioetanol, produciendo 130.000 toneladas de DDGS además de 200.000 MWh anuales. La materia prima utilizada por la planta es también el cereal, principalmente el maíz.
- Biocarburantes Castilla y León, situada en Babilafuente (Salamanca). Propiedad de Vertex Bioenergy, la planta produce 200.000 m³ de bioetanol anualmente. Genera 120.000 toneladas de DDGS, y vierte a la red 200.000 MWh anualmente. Igual que las anteriores, la materia prima utilizada en la planta es el cereal, principalmente el maíz.



Figura 19: Planta Biocarburantes Castilla y León

- Bioetanol de la Mancha, situada en Alcázar de San Juan (Ciudad Real). La planta, propiedad de Acciona y Uriel Inversiones al 50%, puede producir 33.000 toneladas de bioetanol, o unos 42.000 m³. La planta fue ampliada en 2009; entonces tenía una capacidad de 26.000 toneladas. Esta planta utiliza residuos de la producción de vino para convertirlos en bioetanol, por lo que cumple con el Decreto 1085/2015 sobre el fomento del etanol de segunda generación.



Figura 20: Ubicación de las 4 plantas de bioetanol en España

Las tres plantas propiedad de Vertex Bioenergy destinan el etanol producido a ser convertido en ETBE, para posteriormente ser mezclado con la gasolina. Estas tres plantas utilizan plantas de cogeneración, que proporcionan a la vez el calor y la energía eléctrica necesaria para todo el proceso de conversión a bioetanol, suministrando a la red el exceso de electricidad generado.

3.6 PROYECTOS ACTUALES EN ESPAÑA

Actualmente existen varios proyectos cuyo fin es la obtención de bioetanol, ya sea de primera o segunda generación. Los proyectos destinados a bioetanol de primera generación se centran sobre todo en la mejora de la técnica de conversión a bioetanol, con el fin de obtener un mayor rendimiento. Se está explorando también la utilización de materias primas que todavía no se han usado en España. Existen también proyectos que buscan la obtención de bioetanol de segunda generación, con el fin de cumplir con la normativa vigente.

3.6.1 EA GREEN ENERGY

La empresa se encuentra en fase de desarrollo de la Biorrefinería Multifuncional de Barcial del Barco, en Zamora. La empresa ya dispone de financiación para el proyecto, y la diputación de Zamora anunció el día 14 de mayo de 2021 la compra de los terrenos donde se va a instalar la biorefinería, que va a ser construida por Acciona. [40] [41]

Se trata de una Biorrefinería que va a producir 160.000 metros cúbicos de bioetanol anuales, además de 120.000 toneladas de pienso. La materia prima será maíz, remolacha y biomasa, todas producidas en un radio de 50km alrededor de la planta. El proyecto goza del favor de numerosos ayuntamientos de la zona, y la empresa promotora, EA Green Energy, han propuesto nuevas localizaciones para la construcción de otras biorrefinerías.

3.6.2 PERSEO BIOTECHNOLOGY

Esta compañía ha surgido de las compañías Repsol e Imecal. La empresa tiene una patente, llamada Perseo Bioethanol, con la que se puede transformar residuos sólidos urbanos orgánicos en bioetanol. [42]

Transformar residuos sólidos urbanos en bioetanol tiene una ventaja más que evidente, y es que el único coste de la materia prima es el transporte. Además, con su conversión a bioetanol se está realizando también el tratamiento y la eliminación de los RSU.

Actualmente tiene varios proyectos en desarrollo:

- Waste2Bio. Es una planta de escala semi-industrial situada en L'Alcudia (Valencia). Tiene una capacidad diaria de 25 toneladas de residuos urbanos.

- Urbiofin. Su propósito es demostrar la viabilidad de generar a escala semi-industrial bioproductos a partir de RSU. Actualmente disponen de una biorrefinería en Zaragoza.

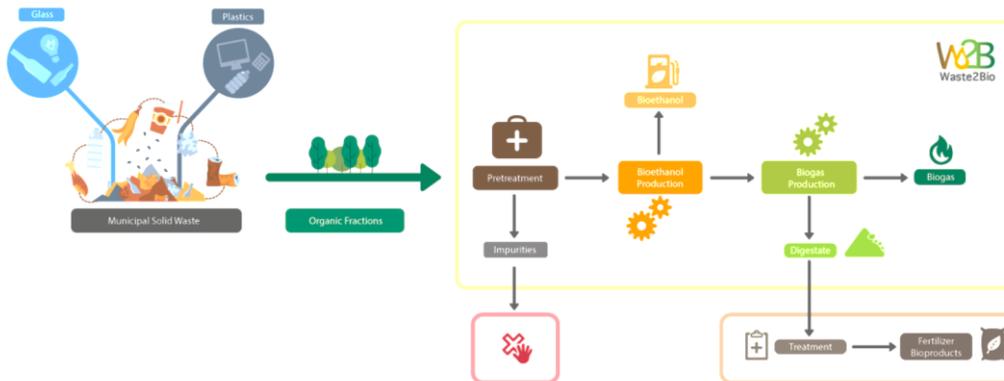


Figura 21: Esquema funcionamiento proyecto Waste2Bio

3.6.3 CLAMBER

[43] La Junta de Castilla la Mancha puso en marcha este proyecto entre 2013 y 2015 con el fin del desarrollo de la bioeconomía. Sus objetivos son:

- Construcción de una Biorrefinería a escala de demostración, que investigue la producción de bioproductos y biocombustibles a partir de biomasa.
- Crear un centro tecnológico en la región, para fomentar la creación de y explotación de nuevos mercados.
- Revitalizar la economía local, y fomentar el crecimiento demográfico de las regiones rurales.
- Crear un sistema de cooperación entre las empresas públicas y las privadas, con el fin de avanzar tecnológicamente.

De momento el proyecto ha realizado una compra de conocimientos, con el fin de una óptima selección de materias primas y la mejora de los procesos, siendo Clamber dueño del 50% de todos los descubrimientos generados en esos proyectos.

Se ha construido también la Biorrefinería I+D+i CLAMBER en Puertollano. No es una planta para producción a escala industrial, sino una planta diseñada para la investigación y el desarrollo de procesos biológicos. Actualmente cuentan con dos líneas de investigación:

- Valorización de residuos lignocelulósicos.
- Valorización de biomasa húmeda fermentable.

Capítulo 4. ANÁLISIS DEL CASO

En el siguiente capítulo se va a realizar un balance de las emisiones de gases de efecto invernadero del bioetanol, desde que se planta la semilla hasta que se consume en un vehículo.

El Real Decreto 1597/2011 establece la metodología para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción y uso de combustibles en el transporte, que deben ser calculados de la siguiente forma:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee},$$

Siendo:

E = las emisiones totales procedentes del uso del combustible,

e_{ec} = las emisiones procedentes de la extracción o del cultivo de las materias primas,

e_l = las emisiones anualizadas procedentes de las modificaciones en las reservas de carbono causadas por el cambio en el uso del suelo,

e_p = las emisiones procedentes de la transformación,

e_{td} = las emisiones procedentes del transporte y la distribución,

e_u = las emisiones procedentes del combustible cuando se utiliza,

e_{sca} = la reducción de emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola,

e_{ccs} = la reducción de emisiones procedente de la captura y retención del carbono,

e_{ccr} = la reducción de emisiones procedente de la captura y sustitución del carbono, y

e_{ee} = la reducción de emisiones procedente de la electricidad excedentaria de la cogeneración.

Se incluyen a continuación las normas principales para el cálculo:

- No se tienen en cuenta emisiones procedentes de la fabricación de la maquinaria.
- Las emisiones GEI procedentes de combustibles se expresarán en gramos equivalentes de CO₂ por MJ de combustible, g CO₂ eq/MJ.

- Se tendrán en cuenta las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄, con un factor de equivalencia a CO₂ de 1, 296 y 23 respectivamente.
- Se incluirán emisiones procedentes de la extracción del cultivo, maquinaria, productos fertilizantes y fitosanitarios. No se tendrá en cuenta la captura de CO₂ en el cultivo de las plantas.
- Se incluirán emisiones de la producción de biocombustibles, materia prima y transporte.
- Se tendrá en cuenta la energía excedentaria, reduciendo las emisiones.
- Las emisiones procedentes del bioetanol al ser utilizado se consideran nulas.

En la siguiente figura se representa el diagrama de flujo para las actividades que se consideran para el sistema de producción del bioetanol que proviene del maíz.

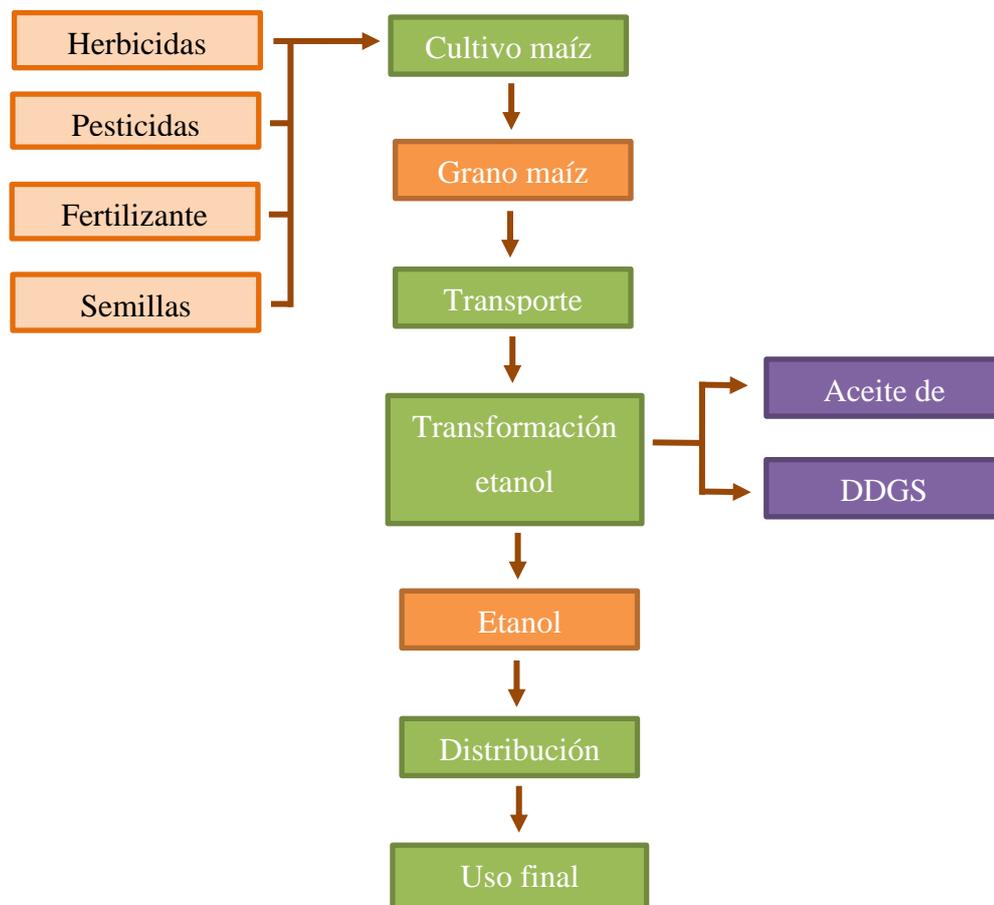


Figura 22: Esquema producción de bioetanol a partir del maíz

Uno de los motivos por los que el uso de biocombustibles puede ser tan importante es que además de poder contribuir a la descarbonización, el bioetanol fomenta el desarrollo rural, contribuyendo a mantener la industria en el campo, cada vez menor. Además, sirve para reducir la dependencia en países extranjeros, fomentando también la economía nacional. Se ha supuesto entonces que la materia prima es 100% procedente de España.

Por un lado se va a estudiar la producción del bioetanol a partir del maíz por los siguientes motivos.

- Amplia disponibilidad de maíz en España. El maíz es un cereal muy cultivado por toda la superficie española, destacando sobretodo Castilla y León, con 110.156 hectáreas cultivadas, y Aragón con 88.228 hectáreas. [38]
- Alto rendimiento de la explotación agrícola. El rendimiento medio del cultivo del maíz en España es de los más altos del mundo, con una media de 11.7 toneladas por hectárea [38]. Además, comparado con el rendimiento agrícola de otros cereales como el trigo (3 t/ha) o la cebada (2.7 t/ha), se obtiene más cantidad de biomasa a partir del mismo suelo, por lo que se requiere menos suelo.
- Subproductos. La conversión del maíz en bioetanol produce varios subproductos que pueden ser reutilizados. Los DDGS y el aceite de bioetanol pueden ser utilizados como alimento para animales, lo que aumenta el valor de la explotación.
- Actualmente es la materia prima más utilizada en España, por lo que es importante ver si realmente es viable. Además, al ser la materia prima principal también en otros países como EEUU, es muy probable que se realicen mejoras en todo el proceso de producción del bioetanol, por lo que su rendimiento debería aumentar.

Para realizar el análisis y calcular el balance de CO₂ es necesario tener en cuenta los siguientes elementos en la fase agraria:

- Uso de superficies y rendimiento

- Uso de fertilizantes
- Uso de agua
- Maquinaria y combustible

4.1.1 CULTIVO DEL MAÍZ

A continuación, se va a realizar un estudio del cultivo del maíz. El rendimiento utilizado es de 11.7 toneladas por hectárea; el rendimiento medio del maíz en España.

4.1.1.1 Fertilizantes, herbicidas y riego

El maíz tiene una alta demanda de nutrientes. Es muy importante controlar la fertilización del maíz, no solo para aumentar la productividad sino para reducir costes y emisiones. El maíz tiene unas necesidades nutricionales similares al resto de los cereales, pero rinde mucho más por unidad de superficie, por lo que su consumo es mayor.

El uso de fertilizantes se ha obtenido a partir de la base de datos ecoinvent3.6 [44], para un cultivo en Estados Unidos, aplicable al 91% de los cultivos estadounidenses. Se trata de unos datos que además son para cultivo de regadío, por lo que son similares a los datos que se obtendrían en España, pues ambos países tienen un rendimiento similar. En la *Tabla 8*: Uso de fertilizantes para el maíz. Fuente: ecoinvent3.6 se puede ver la cantidad de fertilizante necesaria para producir un kilogramo de maíz. Con un rendimiento de 11.7 toneladas por hectárea, se obtiene por tanto el consumo de fertilizantes por hectárea.

Fertilizantes	kg/ha	kg/kg
N	197,379	0,02
P2O5	68,445	0,01
K2O	84,123	0,01

Tabla 8: Uso de fertilizantes para el maíz. Fuente: ecoinvent3.6

El uso de herbicidas e insecticidas también es un factor a tener en cuenta, aunque su uso comparado con el de los fertilizantes es mínimo. A partir de la misma base de datos, se obtiene la siguiente tabla sobre el consumo de herbicidas y pesticidas.

Compuesto	kg/ha	kg/kg maíz
Atrazina	1,083	9,26E-05
Glifosato	0,230	1,97E-05
Metalocloro	0,502	4,29E-05
Fenoxi	0,029	2,49E-06
Triazina	0,028	2,43E-06
Piretroide	0,014	1,23E-06
Organopfosforado	0,114	9,71E-06
Nitrilo	0,011	9,39E-07

Tabla 9: Consumo de productos fitosanitarios para el maíz. Fuente: ecoinvent3.6

En cuanto al riego, se ha supuesto que el agua proviene de una fuente superficial, como un embalse. El consumo de agua se ha obtenido a partir de la misma base de datos, con un consumo de 0.24474 m³ de agua por kilogramo de maíz.

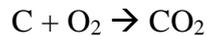
	m3/ha	m3/kg
Riego	2863	0,24474

Tabla 10: Consumo de agua en la producción del maíz. Fuente:

Por otro lado, durante la fotosíntesis el maíz absorbe dióxido de carbono de la atmósfera y lo fija, convirtiéndolo en compuestos orgánicos para su crecimiento. Existen numerosos estudios que pretenden calcular esta absorción de dióxido de carbono por el maíz, y concluyen en que los avances en los métodos del cultivo del maíz podrían permitir que los campos cultivados de maíz se convirtieran en sumideros de CO₂. [44]

En este estudio, se va a calcular el dióxido de carbono capturado únicamente en el grano, aunque en la realidad los tallos, hojas y raíces también lo absorben. Pero, como para producir etanol únicamente se usan los granos de maíz, se ha decidido tener en cuenta únicamente el grano. Se estima que su contenido en carbono es del 44.5% [45]. De modo que, para un rendimiento de 11.7 toneladas de maíz por hectárea, se obtiene un total de 5.2065 toneladas

de carbono. El CO₂ equivalente capturado por los granos se calcula mediante la reacción de oxidación del carbono:



El peso molecular del carbono es 12 gramos, y el del CO₂ 44 gramos. Cada gramo capturado de carbono es igual a 3.67 gramos de CO₂. Se obtiene entonces un total de 19,108 toneladas de CO₂ absorbidas de la atmósfera.

El cultivo del maíz no solo absorbe CO₂ de la atmósfera, sino que también libera gases de efecto invernadero. Los fertilizantes nitrogenados emiten NO₂ cuando son utilizados en los cultivos. Estas emisiones se producen durante la nitrificación (transformación de NH₄⁺ a NO₃) y la desnitrificación (transformación del NO₃⁻ a N₂). Según MITECO, por cada kilogramo de nitrógeno que provenga de algún fertilizante N se emiten 0.04kg de NO₂. De este modo, si por hectárea cultivada se emplean 200 kilogramos de fertilizante N, las emisiones de NO₂ serán de 8 kilogramos, o 2.4 toneladas de CO₂ equivalente. [46]

4.1.1.2 Uso de maquinaria

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación dispone en su página web numerosos informes con la maquinaria y costes de las labores de siembra, abonado y cosecha de los diferentes cultivos que hay en España. [25]

Para el cálculo de la maquinaria, como estipula el Real Decreto 1597/2011 no hay que tener en cuenta las emisiones de fabricación de la maquinaria empleada.

El uso de la maquinaria se ha calculado mediante lo explicado en el apartado 3.2.1, dónde se explicaba el procedimiento de preparación del terreno, siembra, fertilización y cosecha del maíz. Se ha asumido que se emplea un tractor de 120CV de potencia para todas las tareas que lo requieran.

Máquinaria	Capacidad h/ha	Consumo diésel		
		l/h	l/ha	l/t maíz
Grada de discos*	0,37	13,3	4,921	0,421
Arado de vertedera*	1,18	18,3	21,594	1,846
Sembradora monogramo*	1,01	13,2	13,332	1,139
Abonadora centrífuga*	0,12	8,8	1,056	0,090
Pulverizador suspendido*	0,13	13,2	1,716	0,147
Cosechadora de granos	0,65	39,6	25,740	2,200
Total		106,4	68,359	5,843

*Consumo y capacidad para un tractor de 120 CV

Tabla 11: Uso de maquinaria agrícola y consumo para el maíz. Fuente: MAPA

4.1.2 CONVERSIÓN DEL MAÍZ A BIOETANOL

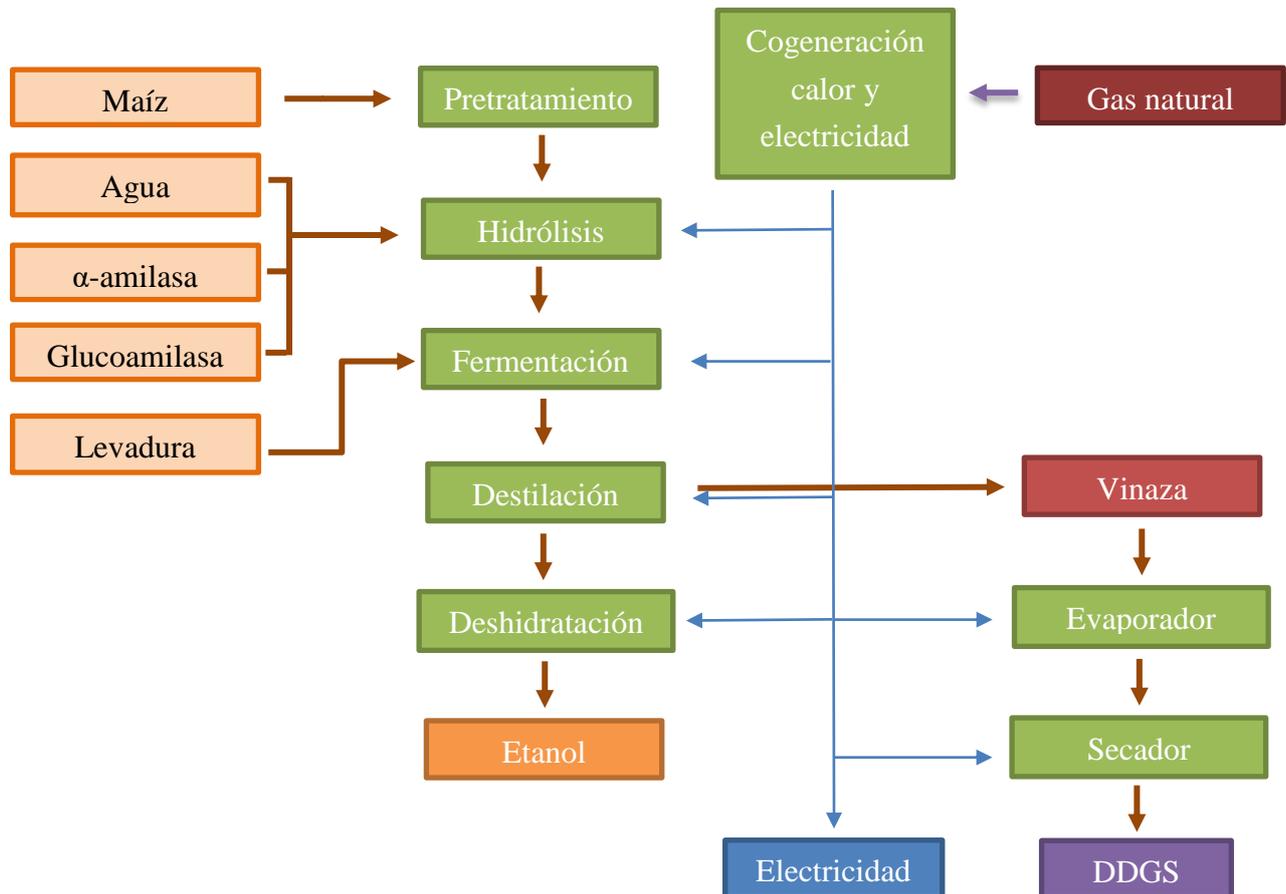


Figura 23: Esquema conversión del maíz a bioetanol y coproductos

La cantidad de bioetanol obtenida se obtiene a partir de la estructura química del maíz y de las enzimas utilizadas para la transformación del almidón en azúcar. Aproximadamente, el

70% del grano de maíz es almidón. El almidón, por medio de enzimas es convertido en glucosa, y la glucosa una vez fermentada es convertida en etanol. La fórmula química es la siguiente:



Como se ha dicho en el apartado 3.3.1 Primera generación, la conversión estequiometria indica que con un gramo de glucosa se obtienen 0.51g de etanol y 0.49g de CO₂, pero eso ocurriría si la reacción fuera perfecta. Se supone por tanto un rendimiento del 95%. Por tanto, a partir de un kilogramo de maíz:

- Contenido de almidón = 0.7 kg
- Residuos = 0.3 kg
- Etanol obtenido tras la fermentación = $0.7 * 0.51 * 0.95 = 0.33915$ kg
- CO₂ obtenido tras la fermentación = $0.7 * 0.49 = 0.343$ kg

Entonces, a partir de un kilogramo se obtienen 0.34 kilogramos de etanol; para conseguir un kilogramo de etanol hacen falta 2.95 kg de maíz. Hay que tener en cuenta además que el maíz almacenado tiene un 14% de humedad, por lo que en realidad la cantidad necesaria de materia prima es mayor, en torno a los 3.3kg de maíz.

En la siguiente tabla se muestra la materia prima necesaria y los consumos energéticos necesarios para la producción de 1kg de bioetanol al 99.7% [47].

Productos	Cantidad	Unidad
Etanol 99,7%	1	kg
DDGS	1,0466	kg
CO2	1,015	kg
Electricidad	0,86099	kWh
Materia prima		
Maíz	3,2639	kg
Ácido sulfúrico	0,02447925	kg
Carbonato de sodio	0,03655568	kg
Sulfato de amonio	0,0097917	kg
Fosfato diamónico	0,0097917	kg
α -amilasa	0,002	kg
Glucoamilosa	0,003	kg
Levadura	0,001	kg
Agua	4,275709	kg
Energía		
Pretratamiento e hidrólisis	0,07833	kWh
	0,70500	MJ
Fermentación y destilación	0,05744	kWh
	2,96689	MJ
Deshidratación	0,00498	kWh
	0,56188	MJ
Electricidad bioetanol	0,14075	kWh
Calor bioetanol	4,23377	MJ
Tratamiento vinaza	0,26568	kWh
	3,64251	MJ
Secado DDGS	7,08593	MJ
Electricidad DDGS	0,26568	kWh
Calor DDGS	10,72844	MJ
TOTAL	0,40644	kWh
	14,96221	MJ

Tabla 12: Consumo de materia prima y energía para la producción de bioetanol a partir de maíz.

Entonces, para la producción de 1kg de bioetanol anhidro se necesitan 3.264kg de maíz con una humedad estándar del 14%. Se obtienen además 1.05kg de granos secos de destilería y 1.02kg de CO₂, que pueden ser vendidos a otras industrias. Las emisiones derivadas de este proceso provienen de la utilización del gas natural en la central de cogeneración.

En cuanto al consumo de materia prima, se ha considerado únicamente la que corresponde a la producción del bioetanol, sin tener en cuenta por tanto los granos secos de destilería. Para el consumo energético, se ha separado la producción de los DDGS del bioetanol, ya que como se puede ver, gran parte de la energía consumida en una planta de bioetanol está destinada a la producción de DDGS. El calor se obtiene a partir del gas natural, consumido en la propia planta de cogeneración.

El cálculo del exceso de electricidad que se vierte a la red por kilogramo de bioetanol producido se ha realizado teniendo en cuenta los datos ofrecidos por Vertex Bioenergy [31]. En la planta Ecocarburantes Españoles S.A. se producen anualmente 200 millones de litros de bioetanol, que equivalen a 157.8 millones de kilogramos de bioetanol. La planta tiene una planta de cogeneración de energía, con una potencia instalada de 22MW, por lo que en la producción de un kilogramo de bioetanol se utilizan aproximadamente 1,267 kWh. A esta cantidad se le resta la electricidad consumida en todo el proceso, tanto como para la producción del bioetanol como el procesado de los DDGS, obteniéndose un exceso de 0.86 kWh, que serán vertidos a la red. Este exceso eléctrico se puede restar luego a las emisiones totales de gases de efecto invernadero, según lo establecido por el Real Decreto 1597/2011.

4.2 PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL SORGO

En la siguiente figura se muestra el proceso de transformación del tallo del sorgo a bioetanol. Como puede verse, el proceso es más simple y menos costoso; no necesita una fuente externa de energía como el gas natural, sino que el propio tallo una vez exprimido es usado como combustible.

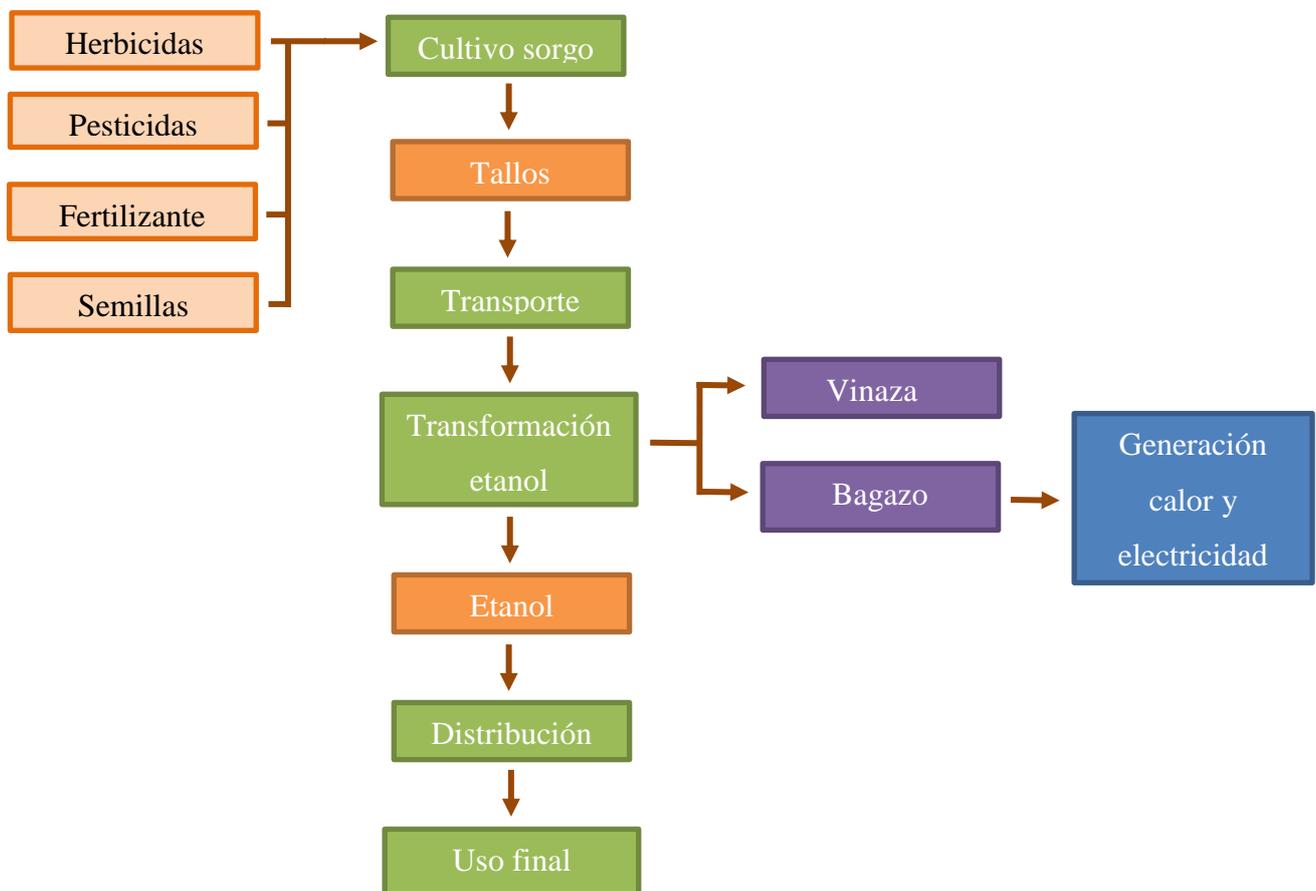


Figura 24: Esquema producción de bioetanol a partir del sorgo

El cultivo de sorgo es una buena alternativa en la producción del bioetanol, no solo por su facilidad para convertirlo en bioetanol sino también por ciertas características agrónomas [26], [49]:

- Baja demanda de fertilización nitrogenada y pesticidas.
- Baja demanda de agua, siendo capaz permanecer latente y reanudar su crecimiento una vez termina la sequía.
- Alto rendimiento. El sorgo es una planta que puede alcanzar los 5 metros de altitud, produciendo una gran cantidad de biomasa por hectárea. En Grecia por ejemplo se han alcanzado rendimientos de biomasa de 126.5 t/ha. En España, se han obtenido rendimientos de 118.6 toneladas de peso fresco. El rendimiento sin embargo depende de la latitud, ya que el sorgo es una planta que prefiere los días cortos y las noches largas.
- Alto nivel de captación de CO₂ de la atmósfera. Se produce una gran cantidad de biomasa por unidad de superficie, con lo que su capacidad de fijación de CO₂ es superior a otros cultivos.
- Alto contenido en azúcar. El sorgo azucarero se caracteriza por su acumulación de azúcar en el tallo, pudiendo alcanzar hasta el 40% del peso del tallo en seco. Esto implica que el rendimiento de azúcar por hectárea es del orden de 10 toneladas.

Presenta sin embargo un gran inconveniente, la rápida degradación del azúcar. Esto supone que el periodo entre que se realiza la cosecha y se transforma en bioetanol debe ser lo más breve posible. Este problema podría solucionarse mediante tanques avanzados de almacenamiento, pero aumentaría el coste de producción. Otra opción podría ser alternar la materia prima en las plantas de producción, de modo que cuando no se utilice los tallos de sorgo se utilice otra materia prima con alto contenido en azúcar, que también sea fácil de cultivar, como la remolacha. [17]

4.2.1 CULTIVO DEL SORGO

A continuación, se va a realizar un estudio del cultivo del sorgo.

4.2.1.1 Fertilizantes, herbicidas y riego

Las necesidades de fertilizante, herbicida y riego, aunque inferiores a las del maíz, siguen siendo un importante factor a tener en cuenta. Al igual que el maíz, se han obtenido los datos a partir de la base de datos ecoinvent3.6, para un cultivo con un rendimiento de 3.860 kg/ha de grano con una humedad del 9.1%, y un rendimiento de tallos de 48.263 kg/ha, al 73% de humedad [50]. Se trata por tanto de un cultivo que podría ser aplicable en España al tener un rendimiento de granos de sorgo similar.

Fertilizantes	kg/ha	kg/kg
N	80	0,00166
P2O5	50	0,00104
K2O	50	0,00104

Tabla 13: Uso de fertilizantes del sorgo. Fuente: ecoinvent3.6

El consumo de productos fitosanitarios es también inferior en el sorgo:

Uso	Compuesto	kg/ha	kg/kg sorgo
Herbicida	Atrazina	0,806	1,67E-05
Herbicida	Glifosato	0,245	5,08E-06
Herbicida	Metalocloro	0,364	7,53E-06
Herbicida	Fenoxi	0,075	1,54E-06
Insecticida	Organopfosforado	0,291	6,04E-06

Tabla 14: Consumo de productos fitosanitarios para el sorgo. Fuente: ecoinvent3.6

Como se había indicado anteriormente, el cultivo del sorgo tiene unas necesidades hídricas muy inferiores al maíz, y aunque el rendimiento del sorgo aumenta si se aumenta el riego, el consumo de agua sigue siendo inferior al del maíz. En este caso, para cultivar un kilogramo de tallos de sorgo se requiere 5 veces menos agua que para un kilogramo de maíz. Se ha supuesto también que el riego procede de una fuente superficial.

	m ³ /ha	m ³ /kg
Agua	2283	0,047311

Tabla 15: Consumo de agua para el riego del sorgo. Fuente:ecoinvent3.6

Al igual que el maíz, el sorgo también tiene un elevado potencial para la fijación del dióxido de carbono de la atmósfera, ya que genera una gran cantidad de biomasa. Igual que para el maíz solo se ha estimado el carbono capturado por el grano, para el sorgo solo se van a utilizar los tallos del sorgo. Los tallos de sorgo son en un 73% agua [50]. Del restante, aproximadamente el 42% es carbono. Se obtiene entonces un total de 5.473 kilogramos de carbono. Multiplicando por el factor 3.67, se obtiene 20,09 toneladas de CO₂ absorbidas de la atmósfera.

Por otro lado, las emisiones de óxido de nitrógeno asociadas al uso de fertilizantes son un importante factor a tener en cuenta. Las emisiones se calculan exactamente igual que para el maíz. De este modo, por hectárea se utilizan 80 kilogramos de fertilizante N, por lo que las emisiones serán de 3.2 kilogramos de N₂O, o bien 947.2 kg CO₂ eq/ha.

4.2.1.2 Uso de maquinaria

El cultivo del sorgo es muy similar al del maíz. Para el cálculo del rendimiento de la maquinaria se ha usado también informes del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, y lo establecido en el apartado 3.2.2. También se ha asumido que se utiliza un tractor de 120CV para todas las tareas que lo requieran. [25]

Máquinaria	Capacidad h/ha	Consumo diésel		
		l/h	l/ha	l/t sorgo
Grada de discos*	0,37	13,3	4,92	0,10
2xCultivador pesado*	0,44	18,3	16,10	0,33
Sembradora chorrillo*	0,6	13,2	7,92	0,16
2xAbonadora centrífuga*	0,12	8,8	2,11	0,04
2xPulverizador suspendido*	0,13	13,2	3,44	0,07
Picadora-cargadora	2,14	18,3	39,08	0,81
Total		85,1	73,58	1,52

*Consumo y capacidad para un tractor de 120 CV

Tabla 16: Uso de maquinaria agrícola y consumo para el sorgo. Fuente: MAPA

4.2.2 CONVERSIÓN DE LOS TALLOS DE SORGO A BIOETANOL

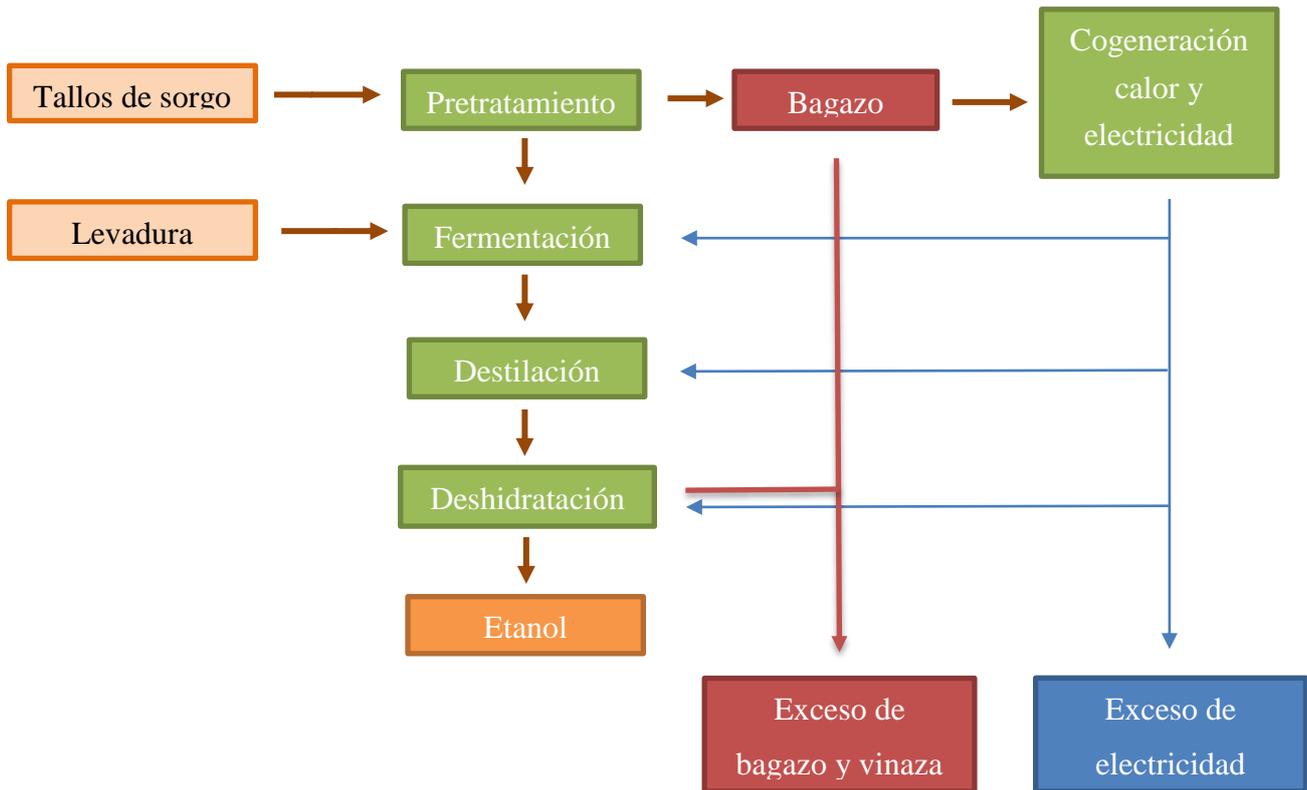


Figura 25: Esquema conversión del sorgo a bioetanol y coproductos

El proceso de conversión de los tallos de sorgo a bioetanol comienza con el pretratamiento. Mediante la molienda, se extrae el jugo de los tallos, que contiene el azúcar a fermentar, y se obtiene el bagazo. El bagazo es entonces utilizado para el suministro de electricidad y calor para todo el proceso de conversión. Durante la combustión del bagazo para producir electricidad y calor se genera un excedente eléctrico, que es suministrado a la red. Este exceso es de 0.74 kWh por kilogramo de bioetanol obtenido.

La ecuación química de la fermentación determina el rendimiento de la reacción. Tras la fermentación, se obtiene el mosto fermentado, con un contenido de bioetanol en torno al 10%. El mosto es destilado, obteniéndose bioetanol con un 95% de pureza, que finalmente es deshidratado, obteniéndose alcohol al 99.7% de pureza.

Según el Real Decreto 1597/2011, como se utiliza el tallo de sorgo como combustible, no hay que tener en cuenta la energía necesaria para la transformación. Tampoco hará falta considerar la energía necesaria para el balance energético ni de emisiones, ya que ambas proceden del sorgo. Sin embargo, se ha decidido añadir las emisiones para el cálculo del impacto real. Las emisiones son las resultantes de la combustión del bagazo y se ha tenido en cuenta el exceso de electricidad.

Los consumos de materia prima han sido obtenidos de la base de datos ecoinvent3.6 [52], [53].

Productos	Cantidad	Unidad
Bioetanol 99,7%	1	kg
Bagazo	0,3147	kg
Vinaza	13,202	kg
Electricidad	0,74473	kWh
Materia prima		
Tallos de sorgo	17,181	kg
Sulfato de amonio	0,005	kg
Fosfato de diamonio	0,005	kg
Ácido sulfúrico	0,0377	kg
Agua	14,704	kg
Emisiones		
CO2	5,454	kg
NO2	6,51E-05	kg
CH4	1,10E-05	kg

Tabla 17: Consumo de materia prima y productos en la producción de bioetanol a partir del sorgo. Fuente: ecoinvent3.6

4.3 FASE DE TRANSPORTE

En esta fase hay que tener en cuenta el transporte desde los campos de cultivo a la planta de producción de bioetanol. Después, el transporte desde la planta hasta la refinería, dónde el etanol será mezclado con la gasolina, transformado a ETBE o simplemente almacenado hasta su distribución a las gasolineras por medio de camiones y oleoductos. Se va a considerar que el transporte del etanol ya producido es el mismo independientemente de su origen. Como toda la materia prima se ha dicho que es producida en España, los gastos energéticos y de emisiones serán relativamente pequeños.

Para el consumo de combustible, se va a estimar que el transporte ocurre mediante camiones de 25 toneladas de capacidad, con un consumo medio de 35 litros de diésel por cada 100 kilómetros.

TRANSPORTE MATERIA PRIMA

En este primer apartado se va a estimar el transporte de la materia prima desde que es cosechado hasta que llega a la planta de producción de etanol.

La materia prima se almacena en un silo, hasta que un camión lleva el grano a la planta de bioetanol. Como se ha dicho anteriormente, se va a suponer que la materia prima es producida en España, por lo que se va a estimar una distancia media para el transporte del grano del campo a la planta de producción de etanol de unos 200km. Lo óptimo sería que esa distancia fuera lo más pequeña posible, pero en la realidad una planta de bioetanol consume tanta cantidad de materia prima que es muy probable que sea necesario recurrir a campos lejanos para satisfacer la demanda.

DISTRIBUCIÓN ETANOL

En este segundo apartado se va a estimar el transporte del bioetanol a las refinerías, donde será mezclado, almacenado y distribuido a las gasolineras.

España actualmente cuenta con extensa red de oleoductos, refinerías e instalaciones de almacenamiento de combustible. Esta red está gestionada por la Compañía Logística de Hidrocarburos. Se muestra a continuación un mapa con sus instalaciones en la península.



Figura 26: Instalaciones de CLH. Fuente: clh.es

Una vez la materia prima es transformada en bioetanol, este es transportado a las 8 refinerías que hay en el país. En estas refinerías es donde el bioetanol es mezclado con la gasolina o donde es transformado en ETBE.

- La distancia de transporte de planta de producción de bioetanol a refinería se ha calculado a partir de las distancias medias. Se ha obtenido que el etanol debe viajar una distancia media de 592 km hasta llegar a la refinería. Esta distancia seguramente sea menor, pero dado que no se disponen de datos relativos a la distribución del etanol a las refinerías se ha optado por realizar este cálculo.
- Se ha considerado la distribución de la refinería a la gasolinera como un solo paso, sin pasar por la instalación de almacenamiento, ya que los gastos energéticos asociados al almacenamiento son insignificantes [51]. Se ha estimado una distancia de 450km para la distribución final del combustible, ya que de este modo se cubre toda el área de la península.

4.4 CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS.

Para el consumo del bioetanol en vehículos se va a comparar los distintos porcentajes de mezcla más representativos del bioetanol con la gasolina (E5, E10 y E85) con el etanol puro. A partir de las propiedades de la gasolina y el etanol puro, se pueden obtener las de las mezclas.

Propiedad	Etanol puro	Gasolina	Unidad
Composición química	C_2H_6O	$C_{8,26}H_{15,5}$	-
Densidad	0,789	0,74	kg/l
Punto de ebullición	78	30-205	°C
Poder calorífico inferior volumétrico	21,30	32,56	MJ/l
Poder calorífico inferior másico	27	44	MJ/kg
Índice de octano research	120	95	-
Índice de octano motor	87	85	-

Tabla 18: Propiedades gasolina y etanol puro

La composición química del etanol es C_2H_5OH , que se puede simplificar como C_2H_6O y tiene un peso molecular de 46 g/mol. La composición química de la gasolina en cambio es mucho más compleja, y hasta cierto punto imposible de definir ya que varía de un lugar a otro. La gasolina es una mezcla de muchos hidrocarburos, con fórmulas químicas que van desde C_6H_{14} hasta $C_{12}H_{26}$. Una aproximación válida es la fórmula $C_{8,26}H_{15,5}$. Su peso molecular es 114.62 g/mol.

Además, hay que calcular el dosado estequiométrico de ambos combustibles. El dosado estequiométrico es la relación entre el aire y el combustible utilizados en la fase de combustión. Para calcularlo, es necesario saber la composición química del aire, pues no todo el aire es oxígeno. La composición del aire es muy variable, dependiendo de la localización, condiciones o altura. En la siguiente tabla se muestra la composición aproximada del aire.

Componentes	Porcentaje
Nitrógeno (N ₂)	78,08
Oxígeno (O ₂)	20,95
Argón (Ar)	0,93
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,035
Vapor de agua (H ₂ O)	variable

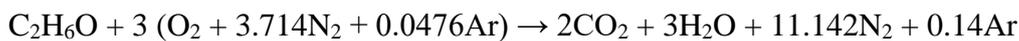
Tabla 19: Composición aproximada del aire

Primero de todo se va a calcular las emisiones teóricas de la gasolina y del etanol puro a través de sus reacciones de combustión. La combustión de los hidrocarburos se da según la siguiente fórmula:



El componente (O₂ + 3.714N₂ + 0.0476Ar) es una formulación aproximada para la composición química del aire, mencionada anteriormente. Se puede obtener entonces la fórmula química de la combustión del etanol y la gasolina, y después el dosado.

- La combustión del etanol se produce según la siguiente ecuación química:



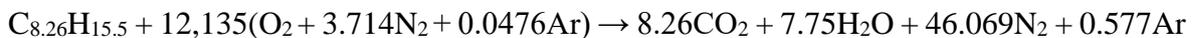
Por cada mol de combustible consumido se necesitan 3 moles de aire, y se obtienen 2 moles de dióxido de carbono además de 3 moles de agua. Los pesos moleculares de la reacción son:

- O₂ = 32 g/mol
- CO₂ = 44 g/mol
- H₂O = 18 g/mol
- N₂ = 28 g/mol
- Ar = 40 g/mol

El dosado estequiométrico del bioetanol se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Dosado bioetanol} &= \frac{\text{masa aire}}{\text{masa bioetanol}} = \\ &= \frac{3 * (32 + 3.714 * 28 + 0.0476 * 40)}{46} = 9 \text{ kg aire/kg combustible} \end{aligned}$$

- La combustión de la gasolina se produce según la siguiente ecuación:



Por cada mol de gasolina consumido, se necesitan 12.135 moles de aire. El dosado se obtiene igual que antes:

$$\begin{aligned} \text{Dosado gasolina} &= \frac{\text{masa aire}}{\text{masa gasolina}} = \\ &= \frac{12.135 * (32 + 3.714 * 28 + 0.0476 * 40)}{114.62} = 14.6 \text{ kg/kg} \end{aligned}$$

Este número en realidad es más bajo, ya que a la gasolina se le añaden compuestos como el ETBE, que aporta oxígeno a la gasolina y reduce el dosado.

Una vez el dosado es conocido, se puede calcular también el contenido energético de la mezcla. Entonces:

- $\text{PCI mezcla etanol} = \frac{\text{PCI etanol}}{\text{masa aire+masa etanol}} = \frac{27 \text{ MJ/kg}}{(9+1) \text{ kg/kg}} = 2.7 \text{ MJ/kg}$
- $\text{PCI mezcla gasolina} = \frac{\text{PCI gasolina}}{\text{masa aire+masa etanol}} = \frac{44 \text{ MJ/kg}}{(14.6+1) \text{ kg/kg}} = 2.82 \text{ MJ/kg}$

A partir de la reacción de combustión, se obtienen también las emisiones de gases de efecto invernadero, por unidad de masa consumida, de volumen y de energía.

- La combustión de un mol de etanol genera 2 moles de dióxido de carbono:

$$\text{Emisiones CO}_2 = \frac{2 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol etanol}} \times \frac{1 \text{ mol etanol}}{0.046 \text{ kg etanol}} \times \frac{0.044 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} = 1.91 \text{ kg CO}_2/\text{kg etanol}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = \frac{1.91 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg etanol}} \times \frac{0.789 \text{ kg etanol}}{1 \text{ l etanol}} = 1.507 \text{ kg CO}_2/\text{l etanol}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = \frac{1.91 \text{ kg CO}_2/\text{kg etanol}}{27 \text{ MJ/kg etanol}} = 0.0707 \text{ kg CO}_2/\text{MJ}$$

- La combustión de la gasolina genera 8.26 moles de dióxido de carbono.

$$\text{Emisiones CO}_2 = \frac{8.26 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol gasolina}} \times \frac{1 \text{ mol gasolina}}{0.11462 \text{ kg gasolina}} \times \frac{0.044 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} = 3.17 \text{ kg CO}_2/\text{kg gasolina}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = \frac{3.17 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg gasolina}} \times \frac{0.74 \text{ kg gasolina}}{1 \text{ l gasolina}} = 2.346 \text{ kg CO}_2/\text{l gasolina}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = \frac{3.17 \text{ kg CO}_2/\text{kg gasolina}}{44 \text{ MJ/kg gasolina}} = 0.0721 \text{ kg CO}_2/\text{MJ}$$

Entonces, con estos datos se pueden calcular las propiedades del combustible que dependen de la masa, como el peso molecular, la densidad, el poder calorífico inferior o el dosado, o las calculadas previamente.

En el caso del E5, las propiedades se calculan según la siguiente fórmula:

$$\text{Propiedad} = 5\% \text{C}_2\text{H}_6\text{O} + 95\% \text{C}_{8.26}\text{H}_{15.5}$$

- Peso molecular E5 = $0.05 \cdot 46 + 0.95 \cdot 114.62 = 111.2 \text{ g/mol}$
- Densidad E5 = $0.05 \cdot 0.789 + 0.95 \cdot 0.74 = 0.742 \text{ kg/l}$
- PCI E5 = $0.05 \cdot 27 + 0.95 \cdot 44 = 43.15 \text{ MJ/kg}$
- Dosado E5 = $0.05 \cdot 9 + 0.95 \cdot 14.6 = 14.32 \text{ kg/kg}$
- PCI mezcla = $\frac{43.15}{14.32+1} = 2.82 \text{ MJ/kg}$

- Emisiones CO₂ = 0.05 · 1.91 + 0.95 · 3.17 = 3.108 kg CO₂/kg
- Emisiones volumétrico = 3.107 · 0.742 = 2.307 kg CO₂/l
- Emisiones energía = $\frac{3.107 \text{ kg/kg}}{43.15 \text{ MJ/kg}} = 0.072 \text{ kg CO}_2/\text{MJ}$

Se puede observar como disminuye el poder calorífico, así como las emisiones de CO₂.

Realizando los mismos cálculos para el resto de mezclas se obtiene la siguiente tabla:

Propiedad	Etanol puro	Gasolina	E5	E10	E85	Unidad
Composición química	C ₂ H ₆ O	C ₈ , ₂₆ H ₁₅ , ₅	-	-	-	-
Densidad	0,789	0,74	0,742	0,745	0,782	kg/l
Poder calorífico inferior volumétrico	21,30	32,56	31,997	31,434	22,992	MJ/l
Poder calorífico inferior másico	27	44	43,15	42,3	29,55	MJ/kg
Poder calorífico inferior mezcla	2,7	2,82	2,82	2,81	2,73	MJ/kg
Índice de octano research (RON)	120	95	-	-	-	-
Índice de octano motor (MON)	87	85	-	-	-	-
Dosado	9	14,6	14,32	14,0	9,84	kg/kg
Emisiones CO ₂ másico	1,913	3,171	3,108	3,045	2,102	kg/kg
Emisiones CO ₂ volumétrico	1,509	2,346	2,307	2,268	1,643	kg/l
Emisiones CO ₂ energía	70,853	72,064	72,026	71,987	71,124	g/MJ

Tabla 20: Propiedades y emisiones de los combustibles

Con la anterior tabla se deduce:

- Por unidad de energía, la combustión de la gasolina produce un 1.71% más de emisiones de dióxido de carbono que el etanol puro.
- Por unidad de energía, el E5 produce un 1.66% más de emisiones de dióxido de carbono, y el E10

Por tanto, la diferencia en las emisiones de CO₂ por unidad de energía entre el bioetanol y la gasolina son muy pequeñas. Tanto que por sí solas no son suficientes para justificar que el uso del bioetanol reduzca las emisiones de CO₂ al usarse en vehículos; es necesario tener en cuenta la fase de cultivo y producción del combustible.

Capítulo 5. RESULTADOS

A continuación se va a mostrar la energía necesaria en cada proceso, así como las emisiones de gases de efecto invernadero.

5.1 BALANCE ENERGÉTICO Y DE EMISIONES DE LAS FASES AGRÍCOLAS.

Los consumos energéticos asociados a la fase de cultivo se muestran en la siguiente tabla. Se ha expresado el consumo energético como MJ fósil por kilogramo de bioetanol producido, y como MJ fósil por MJ de combustible.

	MJ/KG		MJ/MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Fertilizantes	3,2312	1,8489	0,1197	0,0685
Fitosanitarios	0,1445	0,1799	0,0054	0,0067
Maquinaria	0,7910	1,0863	0,0293	0,0402
Riego	0,2379	0,2420	0,0088	0,0090
TOTAL	4,4046	3,3571	0,1631	0,1243

Tabla 21: Consumo energético asociado a la fase agrícola del maíz y sorgo.

Se puede ver como el mayor consumo se da en la producción de los fertilizantes, seguido del consumo de combustible de la maquinaria empleada durante la fase agrícola. En el caso del maíz, la producción de fertilizantes requiere unas cuatro veces más energía que el combustible para las labores, mientras que para el sorgo esa diferencia es menor. El consumo de electricidad para el riego y los productos fitosanitarios en ambos casos representa una pequeña parte del total.

A continuación se muestran los datos de la tabla 28, dispuestos de forma gráfica.

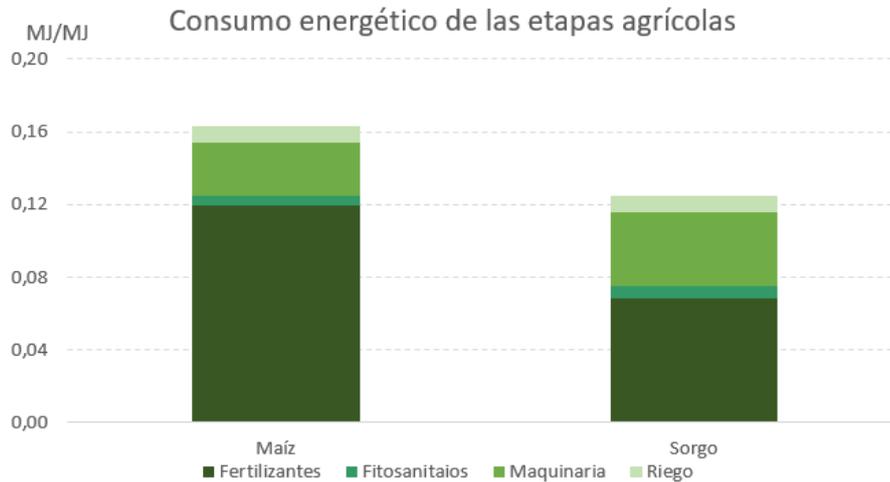


Figura 27: Consumo energético asociado a la fase agrícola del maíz y sorgo.

En la siguiente tabla se muestran las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fase de cultivo de ambas materias primas. Se ha expresado como gramos equivalentes de dióxido de carbono por MJ por kilogramo de bioetanol producido, y como gramos de CO₂ por MJ de bioetanol. De acuerdo con el Real Decreto 1597/2011, en las emisiones de GEI en la fase de cultivo, no se ha tenido en cuenta la absorción de CO₂ por las plantas.

	gCO ₂ /kg		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Otras emisiones	651,954	337,190	24,146	12,489
Fertilizantes	198,103	201,293	7,337	7,455
Fitosanitarios	9,973	12,410	0,369	0,460
Maquinaria	54,857	75,343	2,032	2,790
Riego	16,496	16,786	0,611	0,622
TOTAL	931,383	643,021	34,496	23,816

Tabla 22: Emisiones GEI asociadas a la fase de cultivo del maíz y del sorgo

Se puede ver como la producción y consumo de fertilizantes es la principal fuente de emisiones de GEI. No sólo de CO₂, sino también de N₂O producido por la fertilización del cultivo. El efecto del N₂O se muestra en la fila *otras emisiones*, incluso a la producción de los fertilizantes.

El Real Decreto 1597/2011 establece “valores por defecto para el cultivo” de las principales materias primas utilizadas en España. Según el decreto, el cultivo de maíz para la producción de bioetanol tiene asociadas unas emisiones de 20 g CO₂/MJ, un valor inferior a lo obtenido en el análisis. La diferencia sin embargo, es pequeña, y puede ser debida tanto a las diferencias en la técnica del cultivo (fertilizantes, riego...), como a una metodología diferente empleada para el cálculo de las emisiones.

En el caso del sorgo, el Real Decreto muestra valores asociados su cultivo en las distintas comarcas andaluzas, con unas emisiones en torno a los 52 g CO₂/MJ. Este valor dobla al obtenido en el análisis, y puede ser debido a que los valores dados por el Decreto sean para etanol producido a partir del grano del sorgo, y no de los tallos, lo que cambiaría la cantidad de materia prima necesaria para producir el bioetanol, así como su eficiencia en la transformación a etanol.

5.2 BALANCE ENERGÉTICO Y DE EMISIONES DE LA FASE DE TRANSFORMACIÓN.

A continuación se van a presentar los resultados obtenidos para el balance energético de la transformación de la materia prima a bioetanol, calculadas según estipula el Real Decreto. Se ha expresado el consumo energético como MJ fósil por kilogramo de bioetanol producido, y como MJ fósil por MJ de combustible.

	MJ/KG		MJ/MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Materia prima	1,290	0,569	0,048	0,021
Transformación	4,740	0,000	0,176	0,000
TOTAL	6,030	0,569	0,223	0,021

Tabla 23: Consumo energético asociado a la fase de transformación a bioetanol.

La producción de etanol a partir del maíz tiene un consumo de unos 0.2 MJ por MJ de combustible producido, de los cuales la mayor parte ocurren durante la transformación del bioetanol en la planta como consecuencia del consumo del gas natural. Si se tiene en cuenta la producción de subproductos como los DDGS, el consumo energético aumenta a

17.72MJ/kg, o 0.61 MJ/MJ. En ambos casos se consume menos energía en producir el etanol que la que puede aportar.

En el caso del sorgo, de acuerdo con el Real Decreto, no hay que tener en cuenta la energía necesaria para su transformación, ya que es suministrada por el bagazo del sorgo. De este modo, la energía necesaria se reduce a la asociada a la producción de la materia prima consumida durante la transformación.

Las emisiones de CO₂ son del mismo estilo en la fase de transformación; el sorgo apenas tiene pues no se contabiliza las emisiones derivadas de la combustión del bagazo. Las emisiones del maíz en cambio son significativas, siendo el gas natural empleado como combustible en la planta de generación el responsable de la mayor parte de las emisiones. Como resultado de la cogeneración, se pueden deducir las emisiones correspondientes al exceso de energía vertida a la red.

	gCO ₂ /kg		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Materia prima	81,648	33,488	3,024	1,240
Energía	552,659	0,000	20,469	0,000
Deducciones	-166,481		-6,166	
TOTAL	467,826	33,488	17,327	1,240

Figura 28: Emisiones GEI asociadas a la fase de transformación a bioetanol

A continuación se muestran las emisiones asociadas a la producción del sorgo, pero se han incluido las de la combustión del sorgo.

	gCO ₂ /kg	gCO ₂ /MJ
Materia prima	33,49	1,24
Energía	5473,24	202,71
TOTAL	5506,73	203,95

Tabla 24: Emisiones GEI asociadas a la transformación del sorgo

Se puede ver como las emisiones aumentan en sobremanera, pasando de 1 gramo por MJ a 200 gramos. Al exprimir los tallos de azúcar, aproximadamente un cuarto del sorgo es

convertido en bagazo, de modo que se utilizan unos 4.3kg de bagazo por kilogramo de bioetanol producido.

5.3 EMISIONES A LA FASE DE TRANSPORTE

A continuación se muestra el balance energético y de emisiones asociado a todos los transportes necesarios. Se ha expresado el consumo energético y de emisiones igual que antes como MJ fósil por kilogramo de bioetanol producido, como MJ fósil por MJ de combustible, gramos de CO₂ por kilogramo de bioetanol y gCO₂ por MJ.

	MJ/KG		MJ/MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Materia prima	0,379	1,995	0,014	0,074
A refinería	0,344	0,344	0,013	0,013
A gasolinera	0,261	0,261	0,010	0,010
DISTRIBUCIÓN	0,984	2,600	0,036	0,096

Tabla 25: Balance energético asociado al transporte

	gCO ₂ /kg		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Materia prima	2,255	138,381	0,084	5,125
A refinería	23,841	23,841	0,883	0,883
A gasolinera	18,122	18,122	0,671	0,671
DISTRIBUCIÓN	44,218	180,345	1,638	6,679

Tabla 26: Emisiones asociadas al transporte

Se puede ver como las emisiones del transporte y la energía del bioetanol de sorgo son mayores que las del maíz. Esto es debido a que para la producción de un kilogramo de etanol se requieren 17.181 kilogramos de sorgo, en vez de 3.28 kilogramos de maíz. Así, se necesitarán más viajes del camión para transportar el sorgo a la planta de etanol que para el maíz.

5.4 BALANCE Y EMISIONES ASOCIADAS A TODO EL PROCESO

A continuación se hace el balance final, en el que se incluyen todas las fases, desde el cultivo hasta su llegada al depósito del vehículo.

El balance energético queda de la siguiente manera:

	MJ/KG		MJ/MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Cultivo	4,405	3,357	0,163	0,124
Transformación	6,030	0,569	0,223	0,021
Distribución	0,984	2,600	0,036	0,096
TOTAL	11,419	6,526	0,423	0,242

Tabla 27: Balance energético del bioetanol

El balance energético final para el bioetanol de maíz es 0.423 MJ fósiles por MJ de bioetanol, o lo que es lo mismo 2.36MJ de bioetanol por MJ fósil. Se obtiene más energía al producir bioetanol a partir de maíz que la que se consume. El caso del sorgo es aún mejor, pues el balance es 0.242 MJ fósil por MJ, o 4.13 MJ/MJf. Este valor es muy bueno, y se acerca al rendimiento de la caña de azúcar en Brasil, que es 8.

En cuanto a las emisiones finales, se muestran en la siguiente tabla:

	gCO ₂ /kg		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Cultivo	931,38	643,02	34,50	23,82
Transformación	467,83	33,49	17,33	1,24
Distribución	44,22	180,34	1,64	6,68
TOTAL	1443,428	856,854	53,460	31,735

Tabla 28: Emisiones GEI del bioetanol

A modo de comparación, se ha obtenido las emisiones asociadas a la producción y consumo de la gasolina en Europa, para poder comparar ambos tipos de combustible [52]:

	Gasolina	
	gCO ₂ /kg	gCO ₂ /MJ
Extracción	453,20	10,30
Refinado	448,80	10,20
Distribución	44,00	1,00
Consumo	3170,83	72,06
TOTAL	4116,83	93,56

Tabla 29: Emisiones GEI asociadas a la producción y consumo de la gasolina

Se han dispuesto los datos relativos a las emisiones GEI del bioetanol de sorgo, maíz y gasolina de forma gráfica:

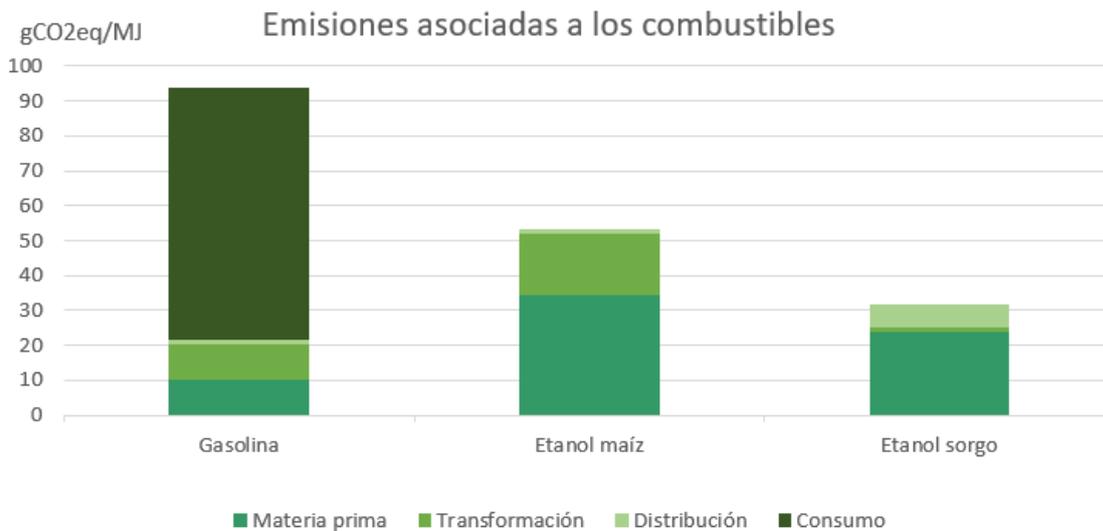


Figura 29: Emisiones GEI asociadas a los combustibles

Se puede ver como la gasolina es la que mayores emisiones tiene, un 75% superior a las del maíz, y tres veces las del sorgo. Es un aumento significativo, que verifica que los biocombustibles reducen las emisiones de gases de efecto invernadero.

Pero, ¿qué ocurre cuando se tiene en cuenta la absorción de CO₂ por las plantas? Se muestran a continuación los resultados en una tabla y de forma gráfica, teniendo en cuenta la captación de dióxido de carbono por las plantas, las emisiones de la combustión del sorgo y el consumo del biocombustible.

	gCO ₂ /kg		gCO ₂ /MJ	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
Cultivo	931,38	643,02	34,50	23,82
Absorción CO ₂	-5324,11	-7150,35	-197,19	-264,83
Transformación	467,83	33,49	17,33	1,24
Emisiones sorgo		5473,24		202,71
Distribución	44,22	180,34	1,64	6,68
Consumo	1913,04	1913,04	70,85	70,85
TOTAL	-1967,638	1092,780	-72,875	40,473

Tabla 30: Impacto final CO₂ biocombustibles

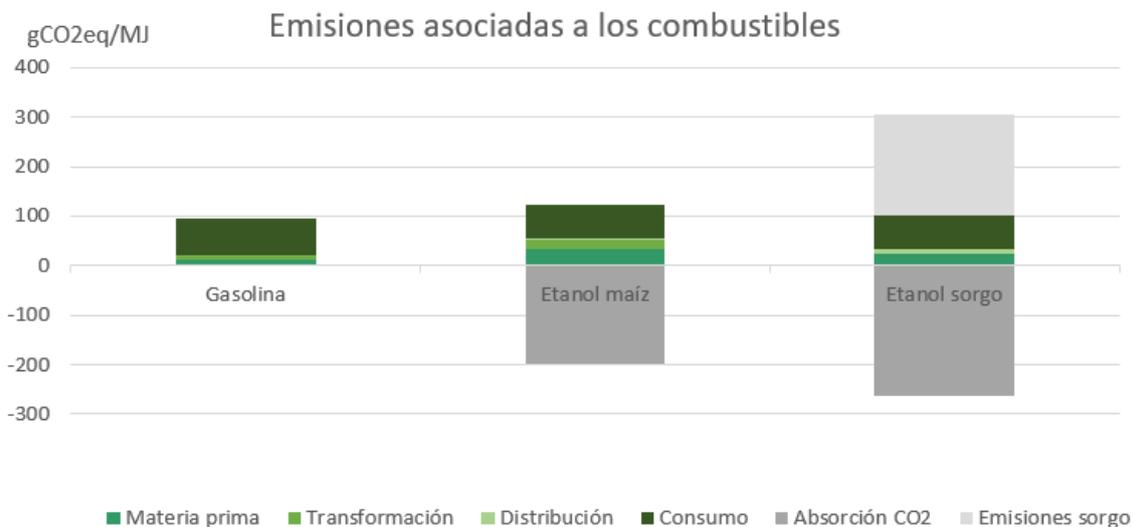


Figura 30: Impacto final combustibles

Las emisiones finales cambian significativamente.

- En el caso del maíz, se obtienen unas emisiones negativas de dióxido de carbono; se absorben casi 73 gramos por MJ de combustible.
- En el caso del sorgo, las emisiones aumentan en 10 gramos de CO₂ por MJ de combustible. Aun así, siguen siendo la mitad que las de la gasolina.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES METODOLOGÍA

El análisis de las etapas agrícolas se ha intentado realizar mediante datos lo más similares posibles a los cultivos españoles. Se ha tratado igualmente de calcular el factor de emisión de las materias primas como si hubieran sido fabricadas en España, así como el diésel consumido en las labores agrónomas. Para el maíz y el sorgo, los datos que se han utilizado han supuesto que los valores proporcionados por el Real Decreto 1597/2011 sean inferiores a los obtenidos. Sin embargo, ello no hace más que confirmar que la utilización de biocombustibles reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación a los combustibles tradicionales. Debido a las suposiciones realizadas, el margen de mejora es amplio, dando la oportunidad de reducir las emisiones asociadas en esta etapa, que es la más importante tanto para el maíz como para el sorgo.

El cálculo de la absorción del CO₂ se ha realizado únicamente en la materia utilizada para su conversión a bioetanol. Se trata de una estimación a la baja, pues las hojas y los tallos de maíz también absorben carbono. Además, las plantas aumentan el contenido de carbono del suelo, por lo que la absorción de CO₂ por las plantas es aún mayor. Aun así, los valores obtenidos cuadran con la bibliografía.

Para el análisis de la etapa de transporte se han tenido en cuenta la localización de las refinerías y plantas de producción de bioetanol, por lo que los valores reales serán próximos a la realidad. Aun así, se han realizado suposiciones como la distancia de transporte de la materia prima o que las plantas de bioetanol suministran a todas las refinerías, cuando probablemente solo lo hagan con las más cercanas.

En cuanto a la etapa de transformación, los datos relativos a la transformación del maíz, aunque no sean exactamente los de las plantas de España, siguen el mismo proceso de producción, por lo que serán similares. En el caso del sorgo, se trata de un proceso que no

se realiza en España, por lo que sus resultados son orientativos. Se ha tratado también que el cálculo de emisiones y energía requeridas en los procesos fueran los más próximo posible a si fueran producidos en España.

6.2 CONCLUSIONES RESULTADOS

Los resultados obtenidos demuestran que los biocombustibles son una buena alternativa a los combustibles tradicionales, ya que reducen las emisiones y la dependencia en los países extranjeros para obtener crudo. Pero para que esta alternativa sea real, se debería tratar de conseguir que toda la materia prima fuera producida en España, pues de este modo se reduciría realmente la dependencia en países extranjeros, y al mismo tiempo se fomentaría la economía rural.

Por otro lado, el cultivo del maíz para bioetanol demuestra ser un buena fuente de producción de bioetanol, no solo por su rendimiento al convertirlo en combustible sino también por sus coproductos como los DDGS o el aceite de maíz. Sin embargo, se trata de un cultivo alimenticio, que podría causar el alza de los precios. Sería interesante el desarrollo de la tecnología 2G para la utilización de los tallos y hojas de maíz para obtener etanol, para aprovechar de forma completa la planta. Aun así, el uso del maíz como materia prima supone una reducción de emisiones GEI del 42.86% con respecto a la gasolina.

El cultivo del sorgo azucarero para producir bioetanol es también una buena opción. Requiere altas temperaturas y poco riego, por lo que su cultivo en el sur de España no supondría ningún problema. Sus bajas necesidades hídricas lo convierten además en una buena opción en la lucha contra la desertificación. Como se había dicho antes, el azúcar presente en los tallos se degrada rápidamente, por lo que el desarrollo de tecnologías de almacenamiento o alternar la producción de bioetanol con otra materia prima con alto contenido en azúcar es muy importante. Los resultados obtenidos proporcionan una reducción de emisiones del 66.07% con respecto a la gasolina.

Como conclusión final, se considera que habría que fomentar la investigación en el campo de los biocombustibles de segunda generación, de modo que los cultivos no compitan con la industria alimenticia, y se cumpla lo establecido en la normativa vigente. Los biocombustibles 2G no sólo son el futuro, sino que incluso podrían ser una alternativa a los vehículos eléctricos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diario del Ayuntamiento de Madrid, «¿Sabes cuál es el origen de la contaminación de Madrid?,» 2019. [En línea]. Available: <https://diario.madrid.es/blog/2019/01/15/sabes-que-provoca-la-contaminacion-en-madrid/>. [Último acceso: 16 Marzo 2021].
- [2] E. País, «Baterías sangrientas: la extracción de cobalto en Congo,» 2020. [En línea]. Available: https://elpais.com/elpais/2020/06/18/planeta_futuro/1592483206_404289.html. [Último acceso: 3 Abril 2021].
- [3] Eurostat, «Glossaire:Tonne équivalent pétrole (tep) - Statistics Explained,» 2021. [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonnes_of_oil_equivalent_\(toe\)/fr](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonnes_of_oil_equivalent_(toe)/fr). [Último acceso: 22 Abril 2021].
- [4] W. Kovarik, «Environmental history / biofuels,» 2013. [En línea]. Available: <https://billkovarik.com/bio/cabi/>. [Último acceso: 16 Mayo 2021].
- [5] U.S. Energy Information Administration, «Ethanol Explained,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/ethanol.php>. [Último acceso: 21 Mayo 2021].
- [6] W. Kovarik, «Henry Ford, Charles Kettering and the fuel of the future,» 1998. [En línea]. Available: <https://environmentalhistory.org/people/henry-ford-charles-kettering-and-the-fuel-of-the-future/>. [Último acceso: 16 Mayo 2021].

- [7] Statista, «Fuel ethanol production worldwide in 2020, by country,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.statista.com/statistics/281606/ethanol-production-in-selected-countries/>. [Último acceso: 16 Mayo 2021].
- [8] V. do Nascimento, «The Brazilian experience of flex-fuel vehicles technology: towards low carbon mobility.,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/UT14/UT14045FU1.pdf>. [Último acceso: 6 Abril 2021].
- [9] Maersk, «Alcohol, Biomethane and Ammonia are the best-positioned fuels to reach zero net emissions.,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.maersk.com/news/articles/2019/10/24/alcohol-biomethane-and-ammonia-are-the-best-positioned-fuels-to-reach-zero-net-emissions>. [Último acceso: 16 Mayo 2021].
- [10] «International Organization for Standardization,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/home.html>. [Último acceso: 22 Mayo 2021].
- [11] Parlamento Europeo y Consejo, *Directiva relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*, 2018.
- [12] Parlamento Europeo y Consejo, *Directiva relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos*.
- [13] Gobierno de España, *Real Decreto 1085/2015*, 2015.
- [14] Gobierno de España, *Real Decreto 1597/2011*, 2011.
- [15] Beta Analytic, «Why Verify Bio-ethanol?,» [En línea]. Available: <https://www.betalabservices.com/biofuels/bio-ethanol-verification.html>. [Último acceso: 14 Mayo 2021].

- [16] CNMC, «Estadística de biocarburantes,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.cnmc.es/estadistica/estadistica-de-biocarburantes>. [Último acceso: 2 Abril 2021].
- [17] A. Alonso-Gómez y A. Bello-Pérez, «Materias primas usadas para la producción de etanol de cuatro generaciones: retos y oportunidades,» 2018. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000700967#B41. [Último acceso: 28 Mayo 2021].
- [18] Ministère de la Transition Écologique, «Biocarburants,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants>. [Último acceso: 28 Mayo 2021].
- [19] Organización de las Naciones Unidas, «El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/i0100s/i0100s00.htm>.
- [20] Wikipedia, «Zea mays,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Zea_mays#Usos_culturales. [Último acceso: 10 Junio 2021].
- [21] Agro-Bio, «La evolución del maíz, el trigo, el arroz y las papas,» [En línea]. Available: <https://www.agrobio.org/la-evolucion-del-maiz-trigo-arroz-las-papas/>. [Último acceso: 10 Junio 2021].
- [22] Greenpeace, «Transgénicos,» [En línea]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/agricultura/transgenicos/#:~:text=En%20Espa%C3%B1a%20son%20muchos%20los,libres%20de%20cultivos%20transg%C3%A9nicos%20comerciales..> [Último acceso: 10 Junio 2021].

- [23] U. N. A. d. México, «Maíz (*Zea mays*),» 2011. [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/semillas/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=25. [Último acceso: 10 Junio 2021].
- [24] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, «Guía práctica de la fertilización de los cultivos en España,» 2009.
- [25] Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, «Maquinaria agrícola,» [En línea]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/maquinaria-agricola/>. [Último acceso: 10 Junio 2021].
- [26] Negro, Solano, Carrasco y Ciria, «Cultivo del sorgo dulce. Efecto de la aplicación de compost,» Madrid, 1998.
- [27] Infoagro, «El cultivo del sorgo,» [En línea]. Available: <https://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/sorgo.htm>. [Último acceso: 15 Junio 2021].
- [28] S. Hajar Mohd Azhar, R. Abdulla, S. AzmahJambo, H. Marbawi, J. Azlan Gansau, A. Azifa Mohd Faik y K. Francis Rodrigues, «Yeasts in sustainable bioethanol production: A review,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405580816302424>. [Último acceso: 1 Mayo 2021].
- [29] «Capítulo 2: Producción de etanol y sus coproductos,» [En línea]. Available: <https://grains.org/lta/wp-content/uploads/sites/6/2019/12/DDGS-Manual-Capitulo-02.pdf>.
- [30] Uyazán, Gil, Aguilar, Rodríguez y Caicedo, «Deshidratación del etanol,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/643/64324308.pdf>.

- [31] «Vertex Bioenergy,» [En línea]. Available: <https://www.vertexbioenergy.com/corn-oil-es.php>. [Último acceso: 2021 Mayo 28].
- [32] S. Riaño, G. Morales, M. Hernández y R. Barrero, «Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos,» 2009.
- [33] K. Robak y M. Balcerek, «Review of Second Generation Bioethanol Production from Residual Biomass,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6117988/>. [Último acceso: 1 Mayo 2021].
- [34] A. E. d. Medioambiente, «Fuel quality in the EU in 2016,» 2017.
- [35] USDA, «Brazil Biofuels Annual,» 2019. [En línea]. Available: https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_8-9-2019.pdf.
- [36] Asociación Española del Bioetanol, «Bioetanol,» [En línea]. Available: <https://bioe.es/bioetanol/>. [Último acceso: 25 Mayo 2021].
- [37] E. F. O. Association, «Technical Product Bulletin ETBE,» 2006.
- [38] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Estadísticas cereales 2019,» 2020. [En línea].
- [39] Campo Galego, «El regadío por goteo del maíz aumenta su rendimiento hasta en un 80%,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.campogalego.es/el-regadio-por-goteo-del-maiz-aumenta-su-rendimiento-hasta-en-un-80/>. [Último acceso: 2 Junio 2021].
- [40] Agrodigital, «El proyecto de Biorrefinería de Barcial del Barco consigue financiación,» [En línea]. Available: <https://www.agrodigital.com/2020/05/25/el->

- proyecto-de-la-biorrefineria-de-barcial-del-barco-consigue-financiacion/. [Último acceso: 15 Junio 2021].
- [41] M. José Salvador, «La Biorrefinería multifuncional de Barcial del Barco a un paso más de ser una realidad,» [En línea]. Available: <https://www.agronewscastillayleon.com/la-biorrefineria-multifuncional-de-barcial-del-barco-un-paso-mas-de-ser-una-realidad>. [Último acceso: 15 Junio 2021].
- [42] «Perseobitech,» [En línea]. Available: <https://www.perseobitech.com/>. [Último acceso: 15 Junio 2021].
- [43] J. Mena Sanz, «CLAMBER: LA APUESTA DE CASTILLA-LA MANCHA POR LA BIOECONOMÍA,» [En línea]. Available: <https://www.publicacionescajamar.es/publicacionescajamar/public/pdf/publicaciones-periodicas/mediterraneo-economico/31/31-793.pdf>.
- [44] N. Jungbluth, «maize grain production,» 2007. [En línea]. Available: <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/37bd1224-f880-4af8-9bea-42da7c7f9bbe/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82>.
- [45] D. E. Clay, J. Chang, S. A. Clay, J. Stone, R. H. Gelderman, G. C. Carlson, K. Reitsma, M. Jones, L. Janssen y T. Schumacher, «Corn Yields and No-Tillage Affects Carbon Sequestration and Carbon Footprints,» 2012. [En línea]. Available: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2134/agronj2011.0353>.
- [46] W. Latshaw y E. Miller, «ELEMENTAL COMPOSITION OF THE CORN PLANT,» 1924. [En línea]. Available: <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43966853/PDF>.
- [47] MITECO, «Emisiones directas por aplicación al suelo de fertilizantes nitrogenados minerales,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y->

evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/1001-emis-direct-fertiliza-inorg_tcm30-496943.pdf.

- [48] N. Jungbluth, «Life Cycle Inventories of Bioenergy,» Uster, 2007.
- [49] Fernández, Martínez, Olalla y Gonzalez, «Nuevos cultivos, nuevos usos, nuevas alternativas,» 1996. [En línea]. Available: http://oa.upm.es/33181/1/INVE_MEM_1996_181682.pdf.
- [50] N. Jungbluth, «sweet sorghum production,» 2007. [En línea]. Available: <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/2b00955a-5fb9-4365-8703-a0cc3a498807/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82>.
- [51] C. Chuck-Hernandez, E. Pérez-Carrillo, E. Heredia y S. O Serna-Saldivar, «Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad,» Diciembre 2011. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/224863383_Sorgo_como_un_cultivo_multifacetico_para_la_produccion_de_bioetanol_en_Mexico_Tecnologias_avances_y_a_reas_de_oportunidad.
- [52] N. Jungbluth, «ethanol production from sweet sorghum,» 2007. [En línea]. Available: <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/c778dc81-13ca-48c8-bc3b-92ca9dc0d067/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82>.
- [53] N. Jungbluth, «dewatering of ethanol from biomass, from 95% to 99.7% solution state,» 2007. [En línea]. Available: <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/c0940e5b-96d1-4e6b-ae4d-3b4d129fe98d/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82>.

- [54] J. M. López, J. Sánchez, Á. Gómez y Á. Fernández, «Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte,» [En línea]. Available: https://www.investigacion-ffe.es/documentos/enertrans/EnerTrans_Flujos_Petroleo.pdf.
- [55] A. Hoekstra, «Producing gasoline and diesel emits more CO2 than we thought,» 16 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://innovationorigins.com/en/producing-gasoline-and-diesel-emits-more-co2-than-we-thought/>. [Último acceso: 1 Julio 2021].
- [56] Y. Lechón, I. Herrera, C. Lago, J. Sánchez y L. Romero, «Evaluación del balance de gases de efecto invernadero en la producción de biocarburantes,» 2011.
- [57] E. Audsley, K. Stacey, D. Parsons y A. Williams, «Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use,» 2008. [En línea]. Available: https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/3913/Estimation_of_the_greenhouse_gas_emissions_from_agricultural_pesticide_manufacture_and_use-2009.pdf.

ANEXO I

En los apartados 4.1 y 4.2 se han obtenido la materia prima y necesidades eléctricas para el cultivo del maíz y su conversión a bioetanol. Es necesario obtener el factor de emisión de los procesos, como la fabricación de materia prima y su utilización.

- Factor de emisiones de los fertilizantes. [53]

Uso	Producto	MJ/kg	CO2	N2O	CH4	Total g CO2eq/kg
			g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	
Fertilizante	N	49,17	3020	2850	190	6060
Fertilizante	P2O5	15,47	990	2,6	30	1023
Fertilizante	K2O	9,73	550	0,4	40	590

Tabla 31: Factor de emisión de los fertilizantes

- Factor de emisiones de productos fitosanitarios. Las emisiones de gases de efecto invernadero se han obtenido tras multiplicar la energía por el factor 0.069 kg CO₂/MJ, estimado para la electricidad procedente de fuentes fósiles. [54]

Uso	Compuesto	MJ/kg	CO2	N2O	CH4	Total g CO2eq/kg
			g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	
Herbicida	Atrazina	188,300	12992,7			12992,7
Herbicida	Glifosato	454,000	31326			31326
Herbicida	Metalocloro	275,800	19030,2			19030,2
Herbicida	Fenoxi	127,700	8811,3			8811,3
Herbicida	Triazina	188,300	12992,7			12992,7
Insecticida	Piretroide	580,000	40020			40020
Insecticida	Organopfosforado	454,000	31326			31326
Insecticida	Nitrilo	214,400	14793,6			14793,6

Tabla 32: Factor de emisión de productos fitosanitarios

- Factor de emisiones del consumo de diésel por parte de la maquinaria agrícola. Se ha obtenido a partir de ecoinvent3.6, a partir de su producción y su consumo por maquinaria agrícola.

Uso	Fase	MJ/kg	CO2	N2O	CH4	Total g CO2eq/kg
			g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	
Maquinaria agrícola	Producción	5,69	194,05	2,02	0,45	196,51
Maquinaria agrícola	Consumo	43,10	3122,39	35,54	29,73	3187,66
Maquinaria agrícola	Diesel	48,79	3316,43	37,56	30,18	3384,17

Tabla 33: Factor de emisión del consumo del diésel por la maquinaria agrícola. Fuente:

- Factor de emisión del riego. Se ha obtenido también a partir de ecoinvent, para el riego por goteo en España con una eficiencia del 90%, obteniéndose:

Uso		MJ/m3	CO2	N2O	CH4	Total g CO2eq/kg
			g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	
Riego	Consumo	0,298	20,2	0,2	0,2	20,7

Tabla 34: Factor de emisión del riego. Fuente: ecoinvent3.6

- Factor de emisión de la materia prima utilizada durante la transformación a bioetanol.
[53]

Uso	Producto	MJ/kg	CO2	N2O	CH4	Total g CO2/kg
			g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	g CO2eq/kg	
Transformación	Ácido sulfúrico	2,29	130		4	134
Transformación	Carbonato de sodio	7,62	138			138
Transformación	Sulfato de amonio	41,84	2640	10	130	2780
Transformación	Fosfato diamónico	54,01	2720	10	140	2870
Transformación	α -amilasa		4500			4500
Transformación	Glucoamilosa		2660			2660
Transformación	Levadura	16,62	970	10	40	1020

Tabla 35: Factor de emisión de la materia

- Factor de emisión del calor y la energía producida en la planta de cogeneración, utilizando como combustible gas natural.

			CO2	N2O	CH4	
Gas natural		MJ/MJ	g CO2eq/MJ	g CO2eq/MJ	g CO2eq/MJ	Total g CO2eq/MJ
Transformacion	Calor	2,088	123,388	0,668	0,052	124,11

			g CO2eq/kWh	g CO2eq/kWh	g CO2eq/kWh	Total g CO2eq/kWh
Gas natural		MJ/kWh	g CO2eq/kWh	g CO2eq/kWh	g CO2eq/kWh	Total g CO2eq/kWh
Transformacion	Electricidad	9,474	192,238	1,041	0,080	193,359

Tabla 36: Factor de emisión de calor y energía en planta de cogeneración. Fuente: ecoinvent3.6