

# Huella de carbono y huella energética del etanol anhidro producido en una mini destilería “minidest” en origen

Recibido 17 de marzo de 2020 //  
Aceptado 18 de diciembre de 2020 //  
Publicado online  
10 de noviembre de 2021

Bongiovanni, R.<sup>1,2</sup>; Tuninetti, L.<sup>3</sup>

## RESUMEN

Este trabajo analiza la huella de carbono y la huella energética del etanol anhidro de maíz producido en una destilería de pequeña escala (minidest) de un productor indicado como representativo por parte de la Cámara de Industrializadores de Granos y Productores de Biocombustibles en Origen (CIGBO), con sede en Córdoba, Argentina. La huella de carbono representa la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por un producto, mientras que la huella energética comprende el total de energía consumida en la producción de un bien. El establecimiento evaluado está ubicado en Buena Esperanza, San Luis, produce su propio maíz para la obtención del etanol, y aprovecha los subproductos (burlanda y vinaza) para la producción de carne bovina en un feedlot contiguo. En este modelo se aprovecha el estiércol recuperado del feedlot que junto con silo de maíz de producción propia son destinados a un biodigestor que genera energía eléctrica y calor, lo que permite abastecer las necesidades de la minidest y vender energía eléctrica a la red. A su vez el digestato, un subproducto del biodigestor, se usa como reemplazo del fertilizante a campo. La unidad funcional es 1 MegaJoule (MJ) de etanol, y el alcance abarca desde la cuna hasta la puerta de la destilería, en la campaña 2018/2019. Se analizaron diferentes métodos de asignación y se destaca la asignación por contenido energético. Los resultados indican una huella de carbono de 19,9 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ y un balance energético de 0,23 MJ de energía invertida por MJ de etanol producido. La huella de carbono significa una reducción del 76% con respecto al combustible fósil de referencia de la Directiva 2018/2001 de la Unión Europea (European Union, 2018). Se detectaron hotspots ambientales en la producción primaria y en destilería, y se realizaron análisis de sensibilidad.

**Palabras clave:** Análisis de Ciclo de Vida, bioetanol, biocombustibles, emisiones, gases de efecto invernadero.

## ABSTRACT

*This study assesses the carbon footprint and the energy footprint of anhydrous corn ethanol, produced in a small-scale distillery (minidest) of a producer indicated as representative by the Chamber of Grain Industrialists and Biofuel Producers in Origin (CIGBO), based in Cordoba, Argentina. The carbon footprint represents all greenhouse gases emitted, while the energy footprint comprises the total energy consumed in the production of ethanol. A representative plant located in Buena Esperanza, San Luis was evaluated, which produces its own corn for the production of ethanol, and which uses the by-products (burlanda and vinasse) for beef production, in an attached feedlot. In this model the manure recovered from the feedlot, together with corn silage, are used in a bio digester to generate electricity and heat, which allows to supply the needs of the minidest and to sell electricity to the grid. In turn, the digestate, a byproduct of the biodigester, is used as a replacement for field fertilizer. The functional unit is 1 MegaJoule (MJ) of ethanol, and the scope covers from the cradle to the door of the distillery, in the 2018/2019 crop season. Different allocation methods were analyzed and the allocation method by energy content was reported. The results indicate a carbon footprint of 19.9 g CO<sub>2</sub> equivalent / MJ and an energy balance of 0.23 MJ of energy invested per MJ of ethanol produced. The carbon footprint means a 76% reduction with respect to reference fossil fuel of the Directive 2018/2001 of the European Union (European Union, 2018). Environmental hotspots were detected in primary production and distillery, and sensitivity analysis were performed.*

**Keywords:** life-cycle assessment, bioethanol, biofuels, emissions, greenhouse gases.

<sup>1,2</sup>Instituto Nacional de Tecnología Argentina (INTA), Universidad Católica de Córdoba (UCC), Ruta 9 km 636, (X5988AAB) Manfredi. Correo electrónico: bongiovanni.rodolfo@inta.gob.ar

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Subgerencia Operativa Regional Centro Departamento de Química Analítica y Residuos urbanos Centro. Av. Vélez Sarsfield 1561, (X5000JKC), Córdoba.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el calentamiento global son los desafíos ambientales más abrumadores que enfrenta la humanidad y es una realidad en la cual se desarrollarán las actividades humanas y los intercambios económicos en los próximos años. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por la actividad humana contribuyen de manera muy significativa al cambio climático (Field *et al.*, 2014).

Un efecto indirecto ha llegado vía el comercio internacional y la preocupación de los consumidores por las emisiones generadas en la producción de los bienes que consumen, especialmente respecto de la huella de carbono y de agua (Frohmann *et al.*, 2012). De acuerdo con el inventario 2014 de GEI de la Argentina, el 51% de las emisiones del país están vinculadas al sector energético; el 39% a la agricultura, a la ganadería y a la silvicultura y a otros usos de la tierra; el 4% a la industria y el 4% restante a los residuos (Dirección Nacional de Cambio Climático, 2019). De esto se desprende la importancia de un estudio que concierne tanto al sector energético como a la agricultura.

Para reducir y manejar los riesgos del cambio climático existen dos estrategias complementarias: la mitigación y la adaptación. Si en las próximas décadas se reducen sustancialmente las emisiones, se podrán lograr disminuciones en los riesgos climáticos a lo largo del siglo XXI y posteriormente ampliar las perspectivas de una adaptación efectiva, reducir los costos y los desafíos de mitigación a largo plazo y contribuir a que las trayectorias de desarrollo sostenible sean resilientes al clima. El primer paso en ese sentido es la determinación de las huellas mediante métodos estandarizados como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El método ACV es un enfoque sistémico y complejo de evaluación de uso, cargas e impactos de todo el intercambio existente entre los sistemas productivos y el medioambiente del territorio donde se sitúan. El método emplea inventarios realizados específicamente para cada producción y en los casos de no existir dicha información, se usan referencias internacionales incluidas en bases de datos. Además de ser un requerimiento creciente en muchos mercados de exportación (Conte Grand y D'Elia, 2017), es una herramienta para mejorar la sustentabilidad de productos y servicios, fronteras adentro. Por un lado, en el caso de los biocombustibles, estas demandas se traducen en la apertura o cierre de la comercialización. Por lo expuesto, existe la necesidad de proporcionar información ambiental del etanol de origen nacional, que sean de referencia en los mercados internacionales.

Por otro lado, la huella energética comprende el total de energía directa e indirecta consumida en la producción de un bien o servicio, ya sea renovable o no renovable, incluyendo fuentes de energía fósiles y biogénicas. Se tienen en cuenta no solo las actividades principales del proceso productivo que consumen energía, sino también los consumos originados en la extracción e industrialización de materias primas e insumos que se usan en los procesos.

Además, y en un sentido más amplio, la información de las huellas ambientales de productos genera conciencia entre los productores, industriales, comerciantes y consumidores, ya que promueve tendencias de producción y consumo responsable y sostenible, aportando al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12: "Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles" planteado por Naciones Unidas.

El objetivo general de este estudio fue calcular la huella de carbono y energética del etanol anhidro producido en una destilería de pequeña escala "minidest" ubicada en el mismo campo donde se produce la materia prima, el grano de maíz, perteneciente a un productor indicado como representativo por parte de la Cámara de Industrializadores de Granos y Productores de Biocombustibles en Origen (CIGBO), con sede en Córdoba, Argentina. Además de la producción agrícola y la destilería, en el campo también se encuentran un feedlot para producción intensiva de ganado bovino y un biodigestor, que genera energía eléctrica y térmica, como resultado del procesamiento de distintos productos y subproductos generados en el campo, la destilería y el feedlot. El estudio se concretó a través de un convenio entre el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Cámara de Industrializadores de Granos y productores de Biocombustible en Origen (CIGBO). El trabajo abarca desde la generación de la materia prima en el campo hasta la obtención del etanol anhidro como producto final, incluyendo los transportes que conectan las etapas y que se utilizan para trasladar insumos.

Como objetivo secundario se buscó conocer el beneficio ambiental de la gestión "circular" que se lleva a cabo con los productos, subproductos y residuos obtenidos de la producción agrícola, la mini destilería, el feedlot y el biodigestor, que implican un ahorro en el consumo de: a) urea como fertilizante sintético, reemplazado con digestato obtenido del biodigestor; b) energía eléctrica de red generada a través de la matriz argentina, basada principalmente en combustibles fósiles, reemplazada por energía eléctrica generada en el biodigestor; y c) energía calórica generada con gas licuado de petróleo (GLP), reemplazada por calor generado en el biodigestor.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de la producción a campo se tomaron de los registros reales provistos por la empresa agrícola-ganadera, los del funcionamiento de la minidest por los registros de la empresa fabricante y operadora de la destilería y los del biodigestor por lo proyectado por la empresa constructora, ya que este último inició sus operaciones con fecha posterior al relevamiento. También se consultaron fuentes de información secundaria, incluyendo el uso de perfiles ambientales unitarios extraídos de bases de datos internacionales (Ecolnvent, 2019).

El alcance de este estudio comprende la estimación y cálculo de la huella de carbono del etanol anhidro desde la generación de la materia prima hasta su venta a empresas de energía. Se tuvieron en cuenta las fuentes de emisión referidas a la producción agrícola propia del grano de maíz, su traslado hasta la mini destilería, la operatoria de esta, incluyendo insumos y energías consumidas y sus traslados y la operatoria del biodigestor con sus entradas y salidas.

Para el caso del feedlot, no fue necesario relevar datos de funcionamiento, producción y crecimiento de los animales, ya que no forman parte de algún insumo o entrada en la producción del objeto de estudio, que es el etanol anhidro; a pesar de que dicho feedlot funciona como sumidero de los subproductos de la destilería que se incluyen en la dieta de los animales (burlanda y vinaza) y como generador de materia prima para el biodigestor (estiércol de los bovinos).

Respecto al alcance temporal de los inventarios, se tomaron datos de la campaña 2018/2019, es decir, del período comprendido entre el 1 de julio de 2018 al 30 de junio de 2019, co-

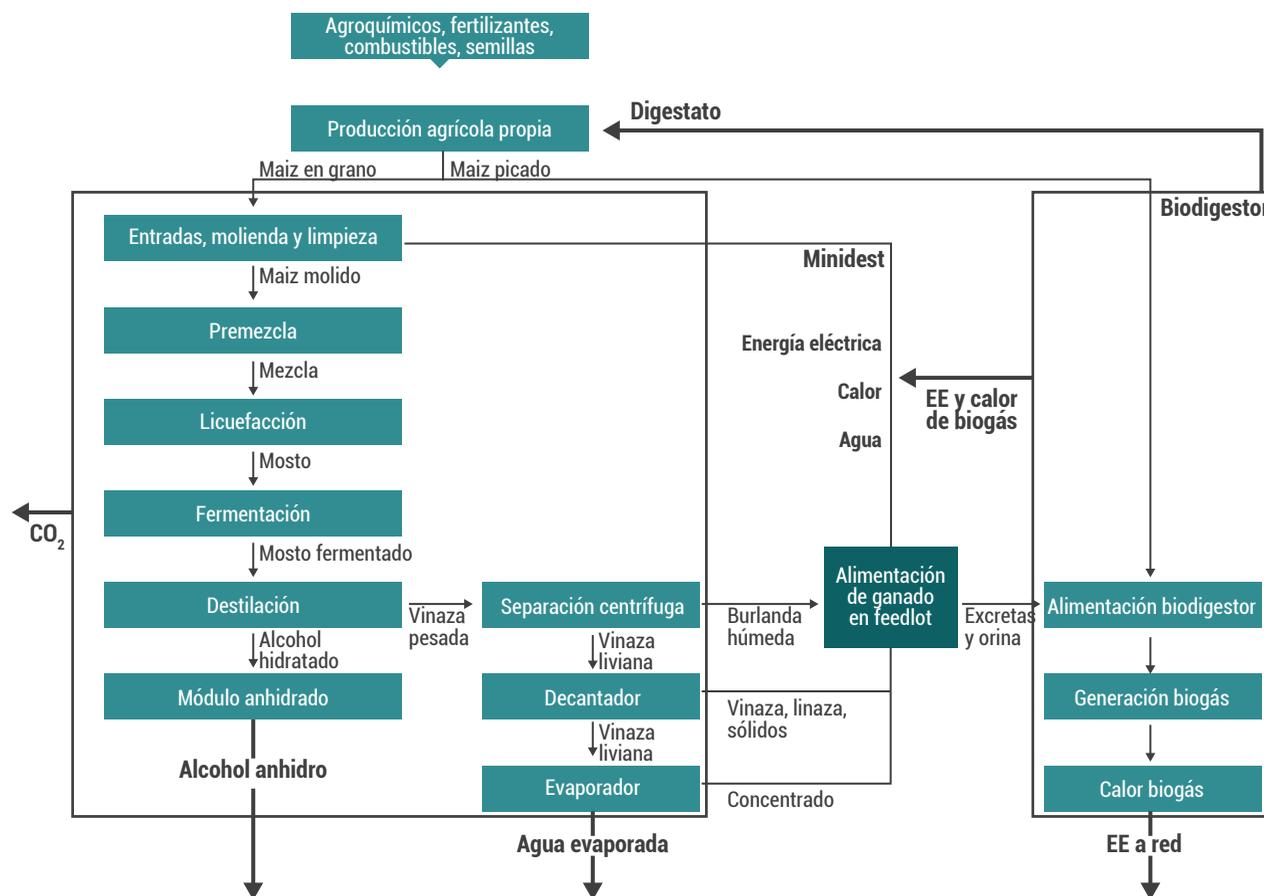


Figura 1. Flujograma de etapas consideradas en el estudio.

respondientes a un año de producción, tanto para las labores agrícolas, como para el funcionamiento de la mini destilería, por tratarse del periodo más reciente al momento del inicio del estudio. En el caso del biodigestor, se usaron las proyecciones calculadas por los autores para las características técnicas de las instalaciones y para la producción esperada, ya que este no estaba operativo al momento del relevamiento.

Siguiendo la Directiva 2018/2001 (European Union, 2018), no se incluyeron en el cálculo los siguientes elementos y eslabones de la cadena de valor: a) variación del stock de carbono en suelos debido a la gestión agrícola, por no contar con información suficiente para realizar la estimación, b) emisiones debidas al cambio de uso del suelo, ya que se informó que la producción de maíz se desarrolla en campos que se encuentran en uso agrícola desde hace más de 20 años; c) impacto por la construcción y fabricación de infraestructura, equipos, máquinas y espacios de usos comunes ya que por su extensa vida útil la participación es poco significativa con respecto al volumen de producción que se maneja<sup>1</sup>; d) transporte del producto etanol anhidro hasta su destino intermedio o final, ni la operatoria en instalaciones de distribuidores, ya que se informó que la logística de recolección y entrega del combustible es la misma que se realizaría para un combustible convencional; e) emisiones ocurridas en la quema o combustión del etanol anhidro.

La figura 1 muestra un flujograma con las etapas consideradas en este estudio.

### Modelo de estimación de emisiones de GEI

El ciclo de producción del etanol anhidro se dividió en las siguientes etapas:

**Producción agrícola:** todas las labores asociadas a la producción de maíz en los lotes que abastecieron a la minidesstilería durante la campaña 2018/2019. Se incluyen las emisiones asociadas al uso de combustibles y lubricantes en las operaciones de laboreo, siembra, fertilización, pulverización y cosecha, como así también las emisiones derivadas de la producción de los insumos del campo como fertilizantes, combustibles, agroquímicos y semillas. Por último, se calcularon las emisiones de nitrógeno derivadas de la fertilización tradicional con urea y de los residuos de cosecha que quedan en el campo. Dentro de la etapa agrícola, se incluyen también las emisiones asociadas al verdeo de cobertura que se produce en los campos durante los meses en que no se hace maíz. Siguiendo el mismo criterio, la metodología utilizada tampoco considera el balance de carbono del cultivo de cobertura.

**Minidestilería:** abarca la recepción y limpieza del grano de maíz, el traslado y uso de insumos como aditivos, enzimas, productos de limpieza, agua, entre otros y los consumos energéticos durante todo el proceso, hasta la obtención del etanol anhidro y los subproductos asociados. También se incluyen las operaciones de acondicionamiento de dichos subproductos previo ingreso al feedlot.

<sup>1</sup>La Directiva 2009-28-CE sobre Biocombustibles establece que "no se tendrán en cuenta las emisiones procedentes de la fabricación de maquinaria y equipos".

**Biodigestor:** las materias primas que alimentan el proceso son el estiércol del ganado bovino del feedlot y el silo de maíz, con sus respectivas emisiones, puesto en la alimentación del digestor. Para esta etapa se contabilizaron los requerimientos energéticos y de combustibles para el funcionamiento de los motores y equipos, rendimientos, productos obtenidos y emisiones atmosféricas generadas. Dado a que la cantidad de animales en un feedlot es variable dentro de un mismo año, se modelaron las variables con valores de "sistema estabilizado", esto se refiere a un feedlot de 12.000 cabezas de ganado, que coincide con la capacidad operativa del biodigestor.

### Emisiones de la producción agrícola

**Emisiones por fertilización y residuos de cosecha.** El modelo de cálculo de emisiones es consistente con las "Directrices del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero" del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático<sup>2</sup>. Se utilizó la metodología de nivel 1 indicada Capítulo 11, Volumen 4 de las Guías del IPCC 2006 (IPCC, 2006). En el caso de los residuos de cosecha se incluyeron las fuentes de emisiones directas e indirectas por lixiviación. Se estimaron las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) por el aporte de fertilización nitrogenada *in situ*. Se incluye, en este último concepto, a las fuentes directas e indirectas por deposición atmosférica y lixiviación asociadas a la aplicación de fertilizantes sintéticos en la situación base analizada.

**Combustibles, lubricantes y neumáticos.** En este concepto se incluyeron las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>), asociadas a la quema de combustibles para las actividades de laboreo, como la preparación, siembra, cosecha y aplicación de fertilizantes y agroquímicos. También el uso de camionetas para recorrer los campos antes del inicio de cada campaña para hacer el seguimiento agronómico del cultivo, chequear el avance, detectar posibles problemas/soluciones y también para trasladar insumos en algunas ocasiones. Se asumió que todo el lubricante utilizado en las máquinas y camionetas se quema, ya sea dentro del motor o en su disposición final y que la proporción que se oxida durante su uso es considerablemente reducida. Debido a que no se contó con información primaria, se contabilizó el uso de lubricante como el 12% del consumo de gasoil<sup>3</sup> (Márgenes Agropecuarios, 2019). Para combustibles y lubricantes se adicionaron las emisiones generadas durante el ciclo de vida productivo, contemplando las etapas de extracción, refinado y transporte de los productos. Por el lado de los neumáticos, se informaron las medidas y la cantidad total que se compró durante la campaña, obteniéndose un valor en kg/ha de neumáticos usados. Los neumáticos usados se usan como peso para cubrir la manta del silo de maíz.

**Agroquímicos y fertilizantes.** Este punto refiere a las emisiones de GEI asociadas al ciclo de producción de los agroquímicos aplicados durante la producción de maíz y del verdeo de cobertura. Para realizar la estimación se calcularon las cantidades de agroquímicos (expresados en kilogramos de principio activo) aplicados a los lotes según los datos del sistema de

gestión de la empresa agrícola<sup>4</sup>. La información de principio activo fue tomada de las hojas de seguridad de los productos. También se tuvieron en cuenta las emisiones derivadas de la producción y destino final de los envases de los distintos agroquímicos utilizados en la etapa agrícola, teniendo en cuenta su capacidad y material de fabricación. Respecto a la disposición, se identificaron aquellos que son quemados, entregados para reciclaje y los que quedan en el campo, cuyo impacto fue asumido como el de un vertedero. El fertilizante utilizado en la situación base analizada es urea a granel, tanto para el maíz como para el centeno. Se contabilizaron las emisiones de su producción y su traslado hasta los campos.

**Uso de semillas y rendimiento del cultivo.** Se contabilizaron las emisiones de GEI asociadas al ciclo de producción de las semillas de maíz y centeno sembradas en los campos, incluyendo el curasemillas utilizado en el caso del maíz. Se informó que se usan 0,63 bolsas de maíz por hectárea y que cada una contiene 14,11 kg de semilla. El rendimiento de grano de maíz utilizado para el modelo es el promedio ponderado de los cuatro campos en los que se sembró maíz durante la campaña 2018/2019. Para el caso del picado se informó un solo valor de rendimiento (tabla 1).

	Hectáreas	Kilos	Rendimiento (kg/ha)
Campo 1	1861	10.571.320	5680
Campo 2	183	529.850	2895
Campo 3	174	600.650	3452
Campo 4	739	3.441.880	4657
Maíz grano (promedio)	2957	15.143.700	5121
Maíz picado (promedio)	1597	3.526.2644	22085

Tabla 1. Rendimiento de maíz.

### Emisiones de la mini destilería

**Materias primas e insumos.** La materia prima principal es el grano de maíz. En la recepción existe una pequeña merma por material no apto; se trata de maíz partido, punta de marlo y peleche, que se destina a la alimentación de animales en el feedlot. Se incluyeron las fuentes de emisión asociadas a la producción, traslados y consumos de energía eléctrica (EE), calor, insumos y productos de limpieza. Se informaron consumos de enzimas glucoamilasa y alfaamilasa, fitasa, ácido ortofosfórico, urea y los antibióticos Fermasure, PhibroXact. Los productos de limpieza considerados fueron cloro, soda cáustica y ácido sulfámico. La energía eléctrica usada en la destilación, el acondicionamiento de los subproductos y en las distintas actividades de mantenimiento del predio se incluyó como un único valor, porque no se pudo identificar los consumos particulares de punto a falta de medidores individuales.

**Reprocesamiento de subproductos.** En el proceso productivo se obtiene un subproducto de gran importancia por su volumen y contenido energético. Se trata de vinaza pesada que

<sup>2</sup>El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (Intergovernmental Panel of Climate Change o IPCC) es el órgano técnico de Naciones Unidas para la temática relacionada al estudio del cambio climático.

<sup>3</sup>Extraído de la Revista Márgenes Agropecuarios.

<sup>4</sup>Sistema Synagro.

sale del destilador. Este subproducto es enviado a una operación de separación centrífuga, de la que se obtienen dos corrientes, la burlanda húmeda, que es enviada en forma directa a alimentación de los animales del feedlot y la vinaza liviana, que es reprocesada. La operación de reprocesamiento que sigue es la decantación, de la que se obtiene una porción de vinaza liviana que se envía a los bebederos de los animales del feedlot, sólidos del decantador, que se envían como alimento a los animales, y otra porción de vinaza liviana que es reprocesada. La última operación de reprocesamiento es la evaporación, de la cual se obtiene un concentrado, utilizado también como alimento en el feedlot, y agua evaporada.

En la situación base analizada, por un lado, existe una emisión por la quema de GLP la cual es considerada en el inventario de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, debido a la fermentación, existe una emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que tiene origen biogénico (proveniente del maíz). Esta emisión no se considera en el inventario por asumirse que el dióxido de carbono emitido fue capturado por la planta en algún momento durante su crecimiento. La metodología indica no considerar ni la captura ni la emisión, asumiendo que las cargas se "netean" en los cultivos energéticos en distintas etapas, que suceden temporalmente en diferentes momentos (The International EPD System, 2016).

Emisiones del transporte que se asignan a la minidest. Se tuvieron en cuenta todos los transportes del maíz desde el campo a la destilería, de los insumos y productos de limpieza, que se envían juntos desde la planta matriz donde se administra la minidest, en la ciudad de Córdoba hasta el campo donde se encuentra la minidest, en Buena Esperanza, San Luis y del GLP, desde la refinería en Luján de Cuyo, Mendoza hasta Buena Esperanza. Los transportes del maíz cosechado se realizan con camiones propios y de terceros. Se hizo un promedio ponderado de los recorridos y el consumo de combustible. Los traslados que regresan sin carga al origen, se cuentan con doble impacto. Es el caso del transporte de GLP y de uno de los cinco viajes anuales que se realizan para el traslado de insumos a la destilería. Cuatro de los camiones se utilizan para cargas de otros procesos, y uno retorna con envases vacíos a Córdoba, para su reutilización.

### Emisiones del biodigestor

Al momento del relevamiento (octubre de 2019) el biodigestor se encontraba en etapa de instalación, con vísperas de comenzar a funcionar en el mes de diciembre de 2019. Por esto es que la información relevada es una proyección que contempla los biodigestores en pleno funcionamiento. La alimentación del biodigestor se hace con estiércol de los bovinos del feedlot, que

es arrastrado por el flujo de agua de limpieza, hasta el ingreso al digestor. También se utiliza silo de maíz picado, como entrada. Este se produce de forma similar al grano de maíz en campos propios, pero en lugar de cosecharse, se pica y traslada hasta el silo, ubicado en inmediaciones del feedlot y del biodigestor. También se contabiliza como entradas al sistema, el uso de insumos como carbón activado, gasoil para el movimiento del manipulador y aceite para el recambio en los motores.

El biodigestor genera como productos finales energía eléctrica, calor y digestato, en estado líquido y sólido. La energía eléctrica se vende a la red, debido a los compromisos asumidos en el plan RENOVAR<sup>5</sup>, al que la firma suscribió. En forma paralela se inyecta a la mini destilería la cantidad de electricidad que esta requiere para operar. El calor generado en los motores es utilizado también en la destilería, en reemplazo del calor generado con el combustible GLP, que se espera se deje de adquirir en forma total. Finalmente, el digestato, tanto líquido como sólido, será utilizado en los campos donde se produce maíz picado en reemplazo de la urea.

Las emisiones atmosféricas derivadas del funcionamiento de los motores y de la generación del biogás fueron informadas por la empresa que instaló el biodigestor. En el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub>, al igual que en la destilería, fueron omitidas, ya que provienen del silo de maíz picado que ingresa como materia prima y por lo tanto tienen origen biogénico.

### Asignación de cargas ambientales

La asignación de cargas ambientales es un paso obligatorio en el cálculo de la huella de carbono de un producto basado en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, siempre que existen otros productos y subproductos además del objeto de estudio. Tiene como finalidad "dividir" la carga ambiental "aguas arriba" de un proceso, entre las distintas salidas que se obtienen de él. La asignación se realiza definiendo el "valor" (no necesariamente monetario) de cada producto y subproducto, ya sea por su masa, su contenido energético, su precio de venta u otro método que resulte apropiado, de acuerdo al tipo de proceso.

### Asignación de cargas ambientales en la mini destilería

En el caso de la destilería, se obtienen los siguientes productos y subproductos: (a) etanol anhidro, (b) burlanda húmeda, concentrado y sólidos, y (c) vinaza liviana. En esta etapa, los autores decidieron utilizar el criterio de asignación por contenido energético para estar en línea con lo establecido por la Directiva 2018/2001 (European Union, 2018). Para esto se de-

<sup>5</sup><http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=4127>

Producto obtenido	Cantidad (kg)	Materia Seca (kg)	Energía contenida (MJ/kg)	Retribución (MJ)	Asignación (%)
Alcohol anhidro 99,5°	1000	1000	26,816	26816	54,0%
Burlanda húmeda + concentrado + sólidos del decantador	3641	1019	16,341	16645	33,5%
Vinaza liviana	6919	379	16,341	6193	12,5%

Tabla 2. Resultados del proceso de asignación de cargas ambientales en la destilería.

bió conocer el poder calorífico de cada componente, que en el caso del etanol es 6400 kcal/kg (Secretaría de Energía, 2020). El conjunto de burlanda húmeda, concentrado y sólidos tiene un 28% de materia seca y cuenta con un poder calorífico de 3900 kcal/kg de materia seca (CEAS, 2017). La vinaza liviana tiene un contenido de materia seca de 5,5%, y un poder calorífico igual al de la burlanda húmeda. Los resultados también muestran los valores según otros criterios de asignación.

Además del criterio de asignación por contenido energético, se calcularon los impactos obtenidos con el criterio de asignación de masa y el criterio de asignación económico para el etanol y los subproductos. En el caso de la asignación por criterio económico no se cuenta a la vinaza por no tener valor de mercado.

Otra técnica usada dentro de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para “restar” parte de la carga ambiental del proceso al producto principal y derivarla a los subproductos es la denominada expansión del sistema. Esta técnica define qué productos del mercado son reemplazados con los subproductos y calcula su carga ambiental para luego restarla al impacto total del producto principal en estudio. De este modo se asume que el producto reemplazado no llegará a ser fabricado, evitando su impacto y cargando ese beneficio al producto objeto de estudio. En el caso de los subproductos de la destilería, todos son usados para alimentación de animales, reemplazando el uso del alimento alternativo Gluten Feed y agua. Se cuenta también el impacto evitado por el transporte de Gluten Feed hasta el lugar donde sería consumido. Se tomaron perfiles de la base de datos Ecolnvent con el impacto ambiental unitario de la producción/generación de estos productos y se multiplicaron por las cantidades que serían reemplazadas con los subproductos de la destilería.

Finalmente, los valores de impacto evitado se restan al impacto total del proceso de producción del etanol (tabla 4).

### Asignación de cargas ambientales en el biodigestor

Los productos obtenidos del biodigestor también deben distribuir la carga ambiental que arrastran “aguas arriba”. En este caso se obtienen cuatro productos principales con valor, que son energía eléctrica, calor, digestato sólido y digestato líquido. Para representar el impacto ambiental de esta etapa, focalizada en la producción de energía eléctrica, los autores decidieron hacer una asignación por valor económico, tomando el precio de venta de la energía eléctrica a la red de: 148,45 USD/MW. El cambio del criterio de asignación se debe a que se tuvieron en cuenta los usos y costumbres empleados en otras industrias del sector, como así también para poder asignarle un impacto ambiental al digestato basado en su valor. El valor económico del calor del biodigestor se asumió igual al precio del calor generado actualmente: 39,3 ARS/kg de GLP, considerando un poder calorífico de 12,91 kWh/kg de GLP y un tipo de cambio de 60 ARS/USD.

Al digestato sólido se le asignó un precio de venta, de acuerdo a su contenido de nitrógeno que es de 0,43%, y en relación con el precio de la urea en el mercado<sup>6</sup>. Con el digestato líquido se asumió lo mismo que en el caso del sólido, pero contemplando que su contenido de nitrógeno es de 0,57%. Dado que el digestato se usa en el mismo establecimiento no existe flete,

<sup>6</sup>La urea en su presentación comercial tiene un 46% de nitrógeno en su composición y un valor de mercado de 395 USD/tonelada, lo que resulta en 858,7 USD por tonelada de nitrógeno elemental.

Asignación por masa	Cantidad (kg)	Materia Seca (kg)	Asignación (%)		
Alcohol anhidro 99,5°	1000	1000	41,7%		
Burlanda húmeda + concentrado + sólidos	3641	1019	42,5%		
Vinaza liviana	6919	379	15,8%		
Asignación económica	Cantidad (kg)	Materia Seca (kg)	Valor económico (\$/kg)	Retribución (\$)	Asignación (%)
Alcohol anhidro 99,5°	1000	1000	38,7	38657	93,9%
Burlanda húmeda + concentrado + sólidos	3641	1019	2,45	2494	6,1%

Tabla 3. Asignación de la carga ambiental por método de masa y por método económico.

Productos y Subproductos	kg CO <sub>2</sub> eq.	MJ
Alcohol anhidro 99,5°	L	-25.282
	1000 kg	-1.869
Burlanda húmeda + concentrado + sólidos	kg	
Gluten Feed	kg	-22639,6
Transporte de carga 16-32 t	tkm	-2574,3
Reemplazo vinaza liviana	kg	
Agua	kg	-67,8
		-4,77

Tabla 4. Asignación de la carga ambiental por expansión del sistema.

Producto obtenido	Cantidad		Valor de mercado <sup>1</sup>		Ingreso esperado (USD)	Asignación
EE (precio de venta)	2,23	MWh	148,45	USD/MW	331,3	70%
Calor (Se computa precio del GLP)	1,79	MWh	50,73	USD/MW	90,6	19%
Digestato sólido (0,43% de N)	2,4	T	858,7	USD/t N	9,0	2%
Digestato líquido (0,57% de N)	8,2	T	858,7	USD/t N	40,2	9%

Tabla 5. Resultados del proceso de asignación de cargas ambientales en el biodigestor (cada 1000 m<sup>3</sup> de biogás obtenido).

sino solo movimientos internos. No se consideraron los impactos del uso de maquinaria especializada para su aplicación.

Una vez armados los inventarios de entradas y salidas de cada operación y etapas, de la base de datos Ecoinvent se obtuvieron las emisiones unitarias asociadas a cada una de esas entradas: insumos, materias primas, energía, etc., referidas a 1 kg, 1 litro, 1 MJ o la unidad que corresponda. Los agroquímicos se buscaron con su nombre comercial y principio activo y si no estaban disponibles de ese modo por su grupo de pertenencia según su acción (herbicida, fungicida, insecticida). Como paso posterior, se asociaron las cantidades usadas de cada "entrada" a sus emisiones unitarias, obteniéndose el impacto para dichas cantidades.

Escenario con aplicación de 100 kg/ha de urea en toda la superficie

Según los datos aportados para la campaña 2018/2019, solo un 14% de la superficie fue fertilizada con urea. Esta situación no refleja la realidad de lo que ocurre frecuentemente en las campañas de producción de maíz en los campos de la zona en general y en los que están bajo el control del grupo empresario. Para compensar esta realidad atípica se definió armar un escenario, un análisis de sensibilidad, que muestre los

cambios en los impactos estudiados derivados del uso de mayor cantidad de urea como fertilizante. El escenario considera puntualmente la aplicación de urea en la misma dosis indicada para la Campaña 2018/2019 (100 kg/ha) para el 100% de la superficie. Con este agregado de fertilizantes se tiene un incremento en el rendimiento del cultivo, que pasa de 5121 kg/ha en el caso base a 7326 kg/ha en el escenario, de acuerdo a los resultados obtenidos en lotes del mismo establecimiento donde se fertilizó con una dosis de 100 kg/ha de urea. Esta situación de extremo sirve para conocer cuál sería el máximo impacto posible a ocurrir derivado del uso de urea; enmarcándose cualquier otra situación de aplicación en una superficie menor dentro del rango del impacto entre la aplicación en un 14% y en el 100% de la superficie.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la huella de carbono son expresados en gramos de dióxido de carbono equivalente (g CO<sub>2</sub> eq); esto significa que se contabilizaron diversos gases de efecto invernadero con distinto poder de calentamiento o afectación, los que se unificaron en CO<sub>2</sub> equivalente a través de un factor

	Huella de carbono (g CO <sub>2</sub> equivalente)			Huella energética (MJ)		
	Por Litro de etanol	Por kg de etanol	Por MJ de etanol	Por Litro de etanol	Por kg de etanol	Por MJ de etanol
Sin asignación	1529,9	2018,9	75,3	21,7	27,6	1,0
<b>Crterios para asignar cargas ambientales</b>						
Sin asignación -con expansión del sistema-	118,6	150,3	5,6	1,8	2,3	0,1
Con asignación -por valor económico-	1496,4	1896,6	70,7	20,4	25,9	1,0
Con asignación -por masa-	664,4	842,1	31,4	9,1	11,5	0,4
Con asignación -por contenido energético-	860,3	1090,3	40,7	11,7	14,9	0,6
<b>Efectos derivados del uso del biodigestor -con asignación energética-</b>						
Considerando uso de calor de biogás	449,2	569,4	21,2	5,7	7,3	0,3
Considerando uso de EE de biodigestor	814,4	1032,2	38,5	10,6	13,4	0,5
Considerando uso calor + EE de biodigestor	403,4	511,3	19,1	4,6	5,8	0,2
Considerando uso calor + EE + digestato (en picado)	402,4	509,9	19,0	4,6	5,8	0,2

Tabla 6. Resultados de la huella de carbono y de la huella energética para el caso base, fertilización del 14% de la superficie con urea.

que refleja sus valores de calentamiento potencial. Finalmente, todas las emisiones se suman y se expresan en g CO<sub>2</sub> eq.

Los resultados de la huella energética son expresados en Mega Joule de energía utilizada (distintos tipos de energía) por Mega Joule, kilogramo o litro de etanol. La tabla 6 muestra los resultados ampliados para el caso base.

Como puede observarse en la tabla 6, en las filas donde se muestran los resultados con diferentes criterios de asignación de cargas, la selección del método es determinante para que la huella de carbono y energética sea mayor o menor. El método de expansión del sistema resulta en este caso, el más benévolo con el producto etanol, ya que la huella se reduce a un 9% del total. El método de asignación por masa también reduce notablemente la huella, llegando a un 42% del total. En tercer lugar, está el método seleccionado, que es la asignación por criterio de contenido energético; en este caso la huella se reduce a un 54% del total, como se mostró en la sección donde se explicó este criterio. Finalmente, el criterio de asignación más "perjudicial" para el etanol es el económico, donde este producto se queda con el 94% de la carga ambiental, dejándole a los subproductos solo el 6%.

La tabla 7 muestra los resultados para el escenario de aplicación de urea en el 100% de la superficie.

Teniendo la visión general de todos los resultados posibles para el etanol y las distintas unidades en que pueden ser expresados, se define mostrar los resultados de huella de carbono y huella energética por Mega Joule de etanol producido. Además, el método de asignación definido es el de contenido energético de productos y subproductos, tal como se mencionó antes. Quitando de las tablas anteriores los resultados expresados en otras unidades de medida y asignados con otros métodos o técnicas se obtiene la tabla 8, de resultados resumidos.

Las emisiones atmosféricas que componen la huella de carbono se incrementan en un 4,5% y los consumos energéticos que componen la huella energética un 3,0% con los datos incorporados en el escenario, respecto a los datos del caso

base. Estos valores corresponden al caso sin asignación y con asignación por contenido energético. Para los casos en que se incorporan los productos del biodigestor a la destilería (calor y energía eléctrica) y a los campos (digestato como fertilizante en picado), las variaciones son distintas, ya que se reducen las emisiones de la industria teniendo las del agro mayor incidencia. De este modo, la diferencia entre el escenario y el caso base asciende a 6,5% en el caso en que se aprovechan todos los productos del digestor.

Analizando en detalle el escenario planteado, si bien existen mayores emisiones por el uso de más cantidad de fertilizante nitrogenado (urea), esta acción conlleva un incremento en el rendimiento del cultivo, lo que beneficia a los valores obtenidos de huella de carbono y energética. El rendimiento de "equilibrio", es decir, aquel que haría que las mayores emisiones de la urea se compensen con el mayor rendimiento obteniendo una huella igual a la del caso base, es de 8400 kg/ha. Este rendimiento es superior al rendimiento real de 7326 kg/ha, informado por la empresa agropecuaria en los lotes donde se fertilizó con 100 kg/ha de urea. Este trabajo se hizo con datos reales de la campaña de cultivo 2018/19. No se consideró variabilidad interanual porque escapa a los objetivos y alcance del trabajo.

Los resultados muestran que la asignación por contenido energético otorga al etanol el 54% del impacto de la cadena productiva; el restante porcentaje se asigna a los subproductos. Evitar el uso de GLP en la destilería supone un significativo ahorro en la huella de carbono del etanol, ya que estas representan el 51,5% del total (producción, transporte y quema del GLP); su reemplazo con calor de biodigestor genera impacto, pero este representa solo el 5% de las emisiones totales, por lo que la reducción de la huella llega al -46,5%.

Evitar el uso de EE de red y usar la energía generada en los motores del biodigestor también implica una disminución del impacto, pero no tan notorio con en el caso del calor; las emisiones bajan del 6,6% al 1,4% del total, obteniéndose una

	Huella de carbono (g CO <sub>2</sub> equivalente)			Huella energética (MJ)		
	Por Litro de etanol	Por kg de etanol	Por MJ de etanol	Por Litro de etanol	Por kg de etanol	Por MJ de etanol
Sin asignación	1641,3	2080,2	77,6	21,5	27,3	1,0
<b>Criterios para asignar cargas ambientales:</b>						
Sin asignación -con expansión del sistema-	166,9	211,5	7,9	1,6	2,0	0,1
Con asignación -por valor económico-	1541,8	1954,1	72,9	20,2	25,6	1,0
Con asignación -por masa-	684,5	867,6	32,4	9,0	11,4	0,4
Con asignación -por contenido energético-	886,4	1123,4	41,9	11,6	14,7	0,5
<b>Efectos derivados del uso del biodigestor -con asignación energética-</b>						
Considerando uso de EE de biodigestor	840,5	1065,3	39,7	10,5	13,3	0,5
Considerando uso calor + EE de biodigestor	429,5	544,4	20,3	4,5	5,7	0,2
Considerando uso calor + EE + digestato (en picado)	428,5	543,0	20,3	4,5	5,7	0,2

Tabla 7. Resultados de la huella de carbono y de la huella energética en el escenario con fertilización 100% de la superficie con urea.

	Caso base campaña 2018/2019		Escenario con fertilización 100% superficie con UREA	
	Huella de carbono	Huella energética	Huella de carbono	Huella energética
	g CO <sub>2</sub> equivalente/MJ	MJ/MJ	g CO <sub>2</sub> equivalente/MJ	MJ/MJ
Sin asignación	75,3	1,03	77,6	1,02
Con asignación - por contenido energético -	40,7	0,55	41,9	0,55
Considerando uso de calor de biogás	21,2	0,27	22,5	0,27
Considerando uso calor + EE de biodigestor	19,1	0,22	20,3	0,21
Considerando uso calor + EE + digestato (en picado)	19,0	0,22	20,3	0,21

Tabla 8. Resultados resumidos de la huella de carbono y de la huella energética en el escenario base y con fertilización 100% de la superficie con urea.

reducción del -5,18%. Reemplazar el uso de urea por digestato en el maíz para silaje, reduce el impacto en un porcentaje menor, esto se debe a que las emisiones de la urea no son relevantes en la cadena del maíz para silaje, y una porción de ellas se compensan en la aplicación del digestato.

Resulta interesante observar las emisiones por etapa o eslabón de la cadena productiva del etanol, de modo de poder analizar dónde se encuentran los cuellos de botella o *hotspots*, sobre los que existe potencial de reducción de emisiones. A los valores asignados por contenido energético se los abre por etapa productiva en agrícola y destilería, tal como se muestra en la tabla 9.

Dentro de la etapa agrícola, se destacan las emisiones del verdeo de cobertura, que se contabiliza como un todo, también de la operación de pulverización y en menor medida las operaciones de siembra, fertilización y cosecha. También tienen un alto valor las emisiones de los residuos de cosecha, principalmente se trata de emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) que tiene un alto factor de calentamiento, que equivale a 265 veces el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por el lado de la destilería, se destacan las emisiones derivadas del uso del GLP, tanto por su producción como por su quema. También las emisiones por la generación de energía eléctrica y en menor medida el uso de otros insumos utilizados en el proceso y sus transportes.

Reducciones alcanzadas. La reducción de emisiones se calculó como un porcentaje con respecto al valor del combustible fósil de referencia EF(t) de 94 g CO<sub>2</sub>eq/MJ considerado en el Anexo v de la directiva de la Unión Europea en su artículo 19, pág. 74.

El porcentaje de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los biocarburantes y biolíquidos se calcula como: REDUCCIÓN = (EF(t) - EB)/EF(t), siendo EB = las emisiones totales procedentes de combustibles de biomasa usados como combustible para el transporte; y EF = las emisiones totales del combustible fósil de referencia para el transporte (pág. 102, Directiva 2018/2001).

Por un lado, de acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 8, y considerando la asignación de todos los coproductos según su contenido energético (19 g CO<sub>2</sub> eq/MJ), el porcentaje de reducción de emisiones sería del 80%. Este valor

está dentro de los límites incluidos en la Directiva Europea de Biocombustibles 2018/2001, la que establece que la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivada de la utilización de combustibles líquidos y gaseosos renovables de origen no biológico para el transporte será de un 70% como mínimo a partir del 1 de enero de 2021 (pág. 48), con respecto al combustible de referencia de 94 g CO<sub>2</sub>eq/MJ. Por lo tanto, el valor obtenido en este estudio supera en 10 puntos porcentuales el objetivo de reducción de la Unión Europea (European Union, 2018)

Por otro lado, y sin perjuicio del valor de referencia de la Unión Europea también se podría considerar el valor informado en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de la República Argentina, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (MAYDS, 2015), en el que se informa un valor de 69,50 g CO<sub>2</sub>eq/MJ para motonafta, en la tabla A2.1 pág. 255: Factores de emisión de gases de efecto invernadero y gases precursores utilizados en la estimación de emisiones del Energía Actividades de quema de combustible del INVGEI 2012. Este valor está relacionado con la emisión de los combustibles y no contempla el ciclo de vida de estos, lo que explica su menor valor total.

Los resultados indican que la huella de carbono obtenida es inferior a la estimada por trabajos similares en Río Cuarto, Córdoba: 27,77 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ (Hilbert, 2019; Hilbert *et al.*, 2019).

En un trabajo del mismo autor realizado en 2015 en Villa María, Córdoba, muestra resultados de 24 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ por asignación balance de masa, 40 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ por asignación económica, 26 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ por contenido energético y sin asignar, 47 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ (Hilbert, 2015).

En Estados Unidos un trabajo realizado para el U.S. Department of Agriculture informa una huella de 58,8 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ (Flugge *et al.*, 2017). En California se calcularon valores que oscilan entre 47,44 a 75,10 g CO<sub>2</sub> equivalente/MJ (CARB, 2009). Se destaca que en EE. UU., las mejoras en tecnologías de proceso (Wang *et al.*, 2007; Plevin y Muller, 2008) y las buenas prácticas agrícolas (Kim *et al.*, 2009) pueden bajar estos valores.

Los menores valores relativos obtenidos en el presente estudio destacan la relevancia de la producción integral de eta-

	Caso base campaña 2018/2019				Escenario con fertilización 100% superficie con urea			
	Huella de carbono (g CO <sub>2</sub> eq./MJ)		Huella energética (MJ/MJ)		Huella de carbono (g CO <sub>2</sub> eq./MJ)		Huella energética (MJ/MJ)	
<b>Resultados</b>	<b>40,7</b>		<b>0,6</b>		<b>41,9</b>		<b>0,5</b>	
<b>Destilería</b>	28,6	70%	0,4	79%	28,6	68%	0,4	79%
Módulo anhidrado	0	0%	0,4	0%	0	0%	0	0%
Destilación	0,2	1%	0	1%	0,2	0%	0	1%
Fermentación	0,5	1%	0	1%	0,5	1%	0	2%
Licuefacción	1,9	5%	0	5%	1,9	5%	0	5%
Premezcla	0,3	1%	0	1%	0,3	1%	0	1%
Entrada, limpieza y molienda	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Consumos comunes EE, GLP, agua	23,3	57%	0	63%	23,3	56%	0,4	64%
Consumos de productos de limpieza	0,6	1%	0,4	2%	0,6	1%	0	2%
Transportes de insumos y MP	1,8	4%	0	5%	1,8	4%	0	5%
Producción agrícola	12,1	30%	0	21%	13,3	32%	0,1	21%
Disposición de residuos	0	0%	0,1	0%	0	0%	0	0%
Siembra directa y con fertilizantes	1,4	3%	0	3%	1	2%	0	2%
Pulverización terrestre	2,7	7%	0	9%	1,9	5%	0	6%
Fertilización al voleo con tractor	0,9	2%	0,1	1%	4,7	11%	0	6%
Cosecha	1,2	3%	0	3%	0,8	2%	0	2%
Rastra semipesada con tractor	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Rolo rastrojero	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Camioneta asesoramiento técnico	0,1	0%	0	0%	0,1	0%	0	0%
Mantenimiento: cambio de aceite	0,2	0%	0	0%	0,1	0%	0	0%
Emisiones de residuos de cosecha	2,7	7%	0	0%	2,6	6%	0	0%
Verdeo de cobertura: centeno	3	7%	0	4%	2,1	5%	0	3%

Tabla 9. Resultados de la huella de carbono y de la huella energética en el escenario base y con fertilización 100% de la superficie con urea.

nol en origen en un esquema de economía circular donde los subproductos de un proceso se constituyen en el insumo del siguiente proceso dentro del mismo establecimiento productivo, lo que no solo evita fletes, sino que conduce a un uso más eficientes de recursos.

## CONCLUSIONES

Se obtuvo la huella de carbono y la huella energética del etanol anhidro de maíz, producido en destilerías de pequeña escala (minidest), en campos de productores agrupados en la Cámara de Industrializadores de Granos y Productores de Biocombustibles en Origen (CIGBO), con sede en Córdoba, Argentina.

En el caso base campaña 2018/2019, la huella de carbono fue de 19,9 g CO<sub>2</sub> equivalente / MJ etanol y el balance energético fue de 0,23 MJ de energía invertida por MJ de etanol producido. La huella de carbono significaría una reducción del 76% con respecto al combustible fósil de referencia de Europa y del 71% con respecto al combustible de referencia de Argentina,

lo cual implicaría una reducción significativa en la emisión de gases de efecto invernadero.

La asignación de cargas ambientales se hizo por contenido energético, lo que otorga al etanol el 54% del impacto de la cadena productiva; el restante porcentaje se asigna a los subproductos. El biodigestor evita el uso de GLP para la generación de calor, lo que supone un ahorro en la Huella de Carbono, ya que estas representan el 49% del total. El uso de energía eléctrica generada en los motores del biodigestor también implica una disminución del impacto, pero no tan notorio como en el caso del calor; las emisiones bajan del 6,55% al 1,37% del total (-5,18%). El reemplazo de la urea por digestato en el maíz destinado a silaje, reduce el impacto en un porcentaje menor, esto se debe a que las emisiones de la urea no son relevantes en la cadena del maíz para silo, y una porción de ellas se compensan en la aplicación del digestato.

Una limitante de este estudio es que la metodología utilizada no considera el balance de carbono del cultivo de maíz ni el de cobertura, tanto por falta de información, como por

	Caso base campaña 2018/2019		Escenario con fertilización 100%	
Sin asignación	75,3	20%	77,6	17%
Con asignación -por contenido energético-	40,7	57%	41,9	55%
Considerando uso de calor de biogás	21,2	77%	22,5	76%
Considerando uso calor + EE de biodigestor	19,1	80%	20,3	78%
Considerando uso calor + EE + digestato (en picado)	19,0	80%	20,3	78%
Valor de referencia (European Union, 2018)	94			

Tabla 10. Reducción de la huella de carbono (g CO<sub>2</sub> eq/MJ) en el escenario base y con fertilización 100% de la superficie, con respecto al combustible de referencia de la Unión Europea.

	Caso base campaña 2018/2019		Escenario con fertilización 100%	
Sin asignación	75,3	-8%	77,6	-12%
Con asignación por contenido energético	40,7	41%	41,9	40%
Considerando uso de calor de biogás	21,2	69%	22,5	68%
Considerando uso calor + EE de biodigestor	19,1	73%	20,3	71%
Considerando uso calor + EE + digestato (en picado)	19,0	73%	20,3	71%
Valor de referencia (MAyDS, 2015)	69,5			

Tabla 11. Reducción de la huella de carbono (g CO<sub>2</sub> eq/MJ) en el escenario base y con fertilización 100% de la superficie, con respecto al combustible de referencia de Argentina.

factibilidad técnica de su cálculo, que escapa a los objetivos de este trabajo.

La información utilizada fue tomada de los registros administrativos de las empresas intervinientes y verificada con los responsables de las operaciones. Los futuros trabajos que se realicen en el sector deberían usar mayor cantidad de información primaria, y así evitar algunos de los supuestos asumidos en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD (CARB). 2009. Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard, vol. i: Staff Report: Initial Statement of Reasons. CARB: 374. (Disponible: [www.arb.ca.gov/regact/2009/lcfs09/lcfsisor1.pdf](http://www.arb.ca.gov/regact/2009/lcfs09/lcfsisor1.pdf) verificado: febrero de 2020).

CEAS. 2017. Mini destilerías para la producción de bioetanol. República Argentina. Anexo: Energía Coproductos. Estudios ambientales y energéticos. CEAS S.A. Córdoba. 13 p.

CONTE GRAND, M.; D'ELIA, V. 2017. Impacto potencial de las restricciones europeas por "fuga de carbono" en las exportaciones de América Latina. Nota técnica del BID, IDB-TN-1232. Banco Interamericano de Desarrollo. Buenos Aires, Argentina.

DIRECCIÓN NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO. 2019. *¿Qué es el cambio climático?* Secretaría de Cambio Climático y Desarrollo Sustentable de la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS). (Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/sustentabilidad/cambioclimatico> verificado: febrero de 2020).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. 2019. Economía Circular. (Disponible: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto> verificado: febrero de 2020).

EUROPEAN UNION. 2018. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Text with EEA relevance). (Disponible: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN> verificado: febrero de 2020).

FIELD, C.; BARROS, V.; DOKKEN, D.; MACH, K.; MASTRANDREA, M.; BILIR, T.; WHITE, L. 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for policymakers in Climate Change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. (Disponible: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_en.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf) verificado: febrero de 2020).

FLUGGE, M.; LEWANDROWSKI, J.; ROSENFELD, J.; BOLAND, C.; HENDRICKSON, T.; JAGLO, K.; PAPE, D. 2017. A Life-Cycle Analysis of the Greenhouse Gas Emissions of Corn-Based Ethanol. Report prepared by ICF under USDA Contract N.o AG-3142-D-16-0243. (Disponible: [https://www.usda.gov/oce/climate\\_change/mitigation\\_technologies/USDAEthanolReport\\_20170107.pdf](https://www.usda.gov/oce/climate_change/mitigation_technologies/USDAEthanolReport_20170107.pdf) verificado: febrero de 2020).

FROHMANN, A.; HERREROS, S.; MULDER, N.; OLMOS, X. 2012. Huella de carbono y exportaciones de alimentos. Guía práctica. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile: ONU.

HILBERT, J. 2015. Análisis de Emisiones Producción de Bioetanol ACABIO Cooperativa Limitada. Research Gate. Estudio realizado por INTA para ACABIO (Periodo Julio 2014-Junio 2015). (Disponible: [https://www.researchgate.net/profile/Jorge\\_Hilbert/publication/325346751\\_Analisis\\_de\\_emisiones\\_produccion\\_de\\_bioetanol\\_ACABIO/links/5b06fadfaca2725783dc366b/Analisis-de-emisiones-produccion-de-bioetanol-ACABIO.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Hilbert/publication/325346751_Analisis_de_emisiones_produccion_de_bioetanol_ACABIO/links/5b06fadfaca2725783dc366b/Analisis-de-emisiones-produccion-de-bioetanol-ACABIO.pdf) verificado: febrero de 2020).

HILBERT, J. 2019. Report on bioetanol carbón footprint BIO4 BG1 BG2. (Disponible: [https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/6071/INTA\\_CIA\\_InstitutodeIngenier%C3%ADaRural\\_Hilbert\\_Bioethanol\\_carbon\\_footprint.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/6071/INTA_CIA_InstitutodeIngenier%C3%ADaRural_Hilbert_Bioethanol_carbon_footprint.pdf?sequence=1&isAllowed=y) verificado: febrero de 2020).

HILBERT, J.; SAPORITI, L.; MANOSALVA, J. 2019. Estudio de la sinergia entre plantas de bioetanol y biogás integradas. VIII Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y VII Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica ENARCIV 2019. Mendoza. 1-3 pp.

IPCC. 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Obtenido de Capítulo 11: Emisiones de N<sub>2</sub>O de los suelos gestionados y emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la aplicación de cal y urea. (Disponible: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html> verificado: febrero de 2020).

KIM, S.; DALE, B.; JENKINS, R. 2009. Life cycle assessment of corn grain and corn stover in the United States. The International Journal of Life Cycle Assessment 14, 160-174.

MÁRGENES AGROPECUARIOS. 2019. Resultados económicos. Buenos Aires: Margenes Agropecuarios.

MAYDS (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE). 2015. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (Disponible: <https://unfccc.int/documents/67499> verificado: febrero de 2020).

PLEVIN, R.; MUELLER, S. 2008. The effect of CO<sub>2</sub> regulations on the cost of corn ethanol production. Environmental Research Letters, 3: 024003.

SECRETARÍA DE ENERGÍA. 2020. Documento metodológico del Balance Energético Nacional de la República Argentina, año 2015. Secretaría de Gobierno de Energía. Subsecretaría de Planeamiento Energético. Dirección Nacional de Información Energética. (Disponible: <http://datos.minem.gov.ar/dataset/balances-energeticos> verificado: febrero de 2020).

THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM. 2016. Product category rules according to ISO 14025. Arable crops v2.0 DATE 2016-06-23. (Disponible: <https://www.environdec.com/PCR/Detail/?Pcr=8804> verificado: febrero de 2020).

UNIÓN EUROPEA. 2009. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. (Disponible: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISUM%3Aen0009>; <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf> verificado: febrero de 2020).

WANG, M.; WU, M.; HUO, H. 2007. Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. Environmental Research Letters, 2-13.