

Aspectos relevantes de la sostenibilidad ambiental

en la cadena productiva
de la caña de azúcar



Múnera Castañeda, Bryan Esteban

Aspectos relevantes de la sostenibilidad ambiental en la cadena productiva de la caña de azúcar / Bryan Esteban Múnera Castañeda; David Palacios García; Nicolas Javier Gil Zapata. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Ed.) -- Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2024.

28 p. (Agroindustria de la caña de azúcar en Colombia)

Incluye referencias bibliográficas

ISBN 978-958-8449-32-6

1. Caña de azúcar. 2. Agroindustria. 3. Huella hídrica. 4. Gases de efecto invernadero. 5. Huella de carbono. 6. Gestión ambiental.

I. Palacios García, David. II. Gil Zapata, Nicolás Javier. III. Título. IV. Agroindustria de la caña en Colombia

633.61 CDD 23 ed.

M965

Cenicaña – Biblioteca Guillermo Ramos Núñez

Cenicaña © 2024

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia

Calle 38 norte No. 3CN-75. Cali, Valle del Cauca, Colombia

Estación experimental: San Antonio de los Caballeros, vía Cali-Florida km 26

www.cenicana.org

Producción editorial: Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología

Coordinación editorial: Victoria Carrillo C.

Corrección de textos: Ernesto Fernández R.

Diseño e ilustración: Alcira Arias V.

Cita bibliográfica

Múnera Castañeda, B. E., Palacios García, D. & Gil Zapata, N. J. (2024). Aspectos relevantes de la sostenibilidad ambiental en la cadena productiva de la caña de azúcar.

En: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Ed). Agroindustria de la caña de azúcar en Colombia. Cenicaña. <https://www.cenicana.org/coleccion-agroindustria-de-la-cana-de-azucar/>

Aspectos relevantes de la sostenibilidad ambiental en la cadena productiva de la caña de azúcar

Bryan Esteban Múnera Castañeda

David Palacios García

Nicolás Javier Gil Zapata





Contenido

Introducción	5
Manejo y gestión del agua en las fábricas de azúcar y etanol	6
Inventario de gases de efecto invernadero y huella de carbono en la cadena agroindustrial de la caña de azúcar	16
Referencias	26





Introducción

En su visión estratégica con horizonte al año 2030, el sector agroindustrial de la caña de azúcar busca asegurar su sostenibilidad manteniendo el equilibrio entre tres pilares fundamentales: el desarrollo social, la conservación del ambiente y el desarrollo económico. Es evidente, por tanto, que mejorar el desempeño ambiental de la cadena productiva de la caña de azúcar debe contribuir notablemente a los logros trazados en el marco de la sostenibilidad.

En tal propósito, ingenios y cultivadores se encuentran alineados con el cumplimiento de metas comunes que buscan reducir el consumo de insumos y de agua, la generación de residuos y de vertimientos, y lograr que la producción de azúcar y sus derivados cumpla con los estándares internacionales de sostenibilidad. Con ello el sector ratifica su compromiso con la sociedad y el ambiente y da un valor agregado a sus productos. A continuación se destacan los logros y acciones del sector azucarero colombiano en materia de sostenibilidad ambiental, resultado del trabajo conjunto en los últimos años entre ingenios, cultivadores y Cenicaña.

Manejo y gestión del agua en las fábricas de azúcar y etanol

Al igual que en el campo, en la fábrica el agua cumple funciones de alta importancia, y su deficiente suministro es un factor limitante en la operación fabril porque es el insumo principal de procesos fundamentales como la generación de vapor, entre otros.

En general, el uso del agua en el procesamiento de la caña de azúcar es alrededor de 20 m³ por cada tonelada molida (ANA, 2009). Para el caso de las fábricas del valle del río Cauca, este valor está entre 23.5 m³/t caña y 26.3 m³/t caña, según el sistema de limpieza de la caña y el porcentaje de recirculación de agua en los circuitos cerrados. La **Figura 1** muestra los usos del agua en un ingenio piloto. En este contexto, ‘uso’ es la cantidad de agua requerida por el proceso para cumplir su función específica; es decir, el término ‘uso’ no implica necesariamente captación o consumo.

Como se puede observar en la figura, el uso del agua en el proceso sucroenergético cumple

principalmente funciones de enfriamiento (86% del uso total) en etapas en las que generalmente el líquido se maneja en circuitos cerrados, entre los cuales el de inyección y rechazo es especialmente relevante tanto en el proceso de elaboración de azúcar como en el consumo de agua y energía. En este circuito el agua se utiliza para condensar los vapores del proceso con el objeto de producir el vacío necesario en los últimos efectos de evaporación del jugo y en los tachos para la cristalización del azúcar. Para recircular el agua en el circuito se utiliza una piscina de enfriamiento donde, por aspersión, se transfiere el calor entre el agua y el aire circundante. La cantidad de agua que requiere ser recirculada dependerá de su temperatura a la salida de la piscina de enfriamiento. Cenicaña estima que mejorar el funcionamiento de una piscina con 29% de eficiencia, hasta llevarla a 50% (valor óptimo en este tipo de sistemas) reduciría en 42% el uso de agua. Más aún: esta disminución se reflejaría en un ahorro del 63% de la energía consumida en el sistema de bombeo.

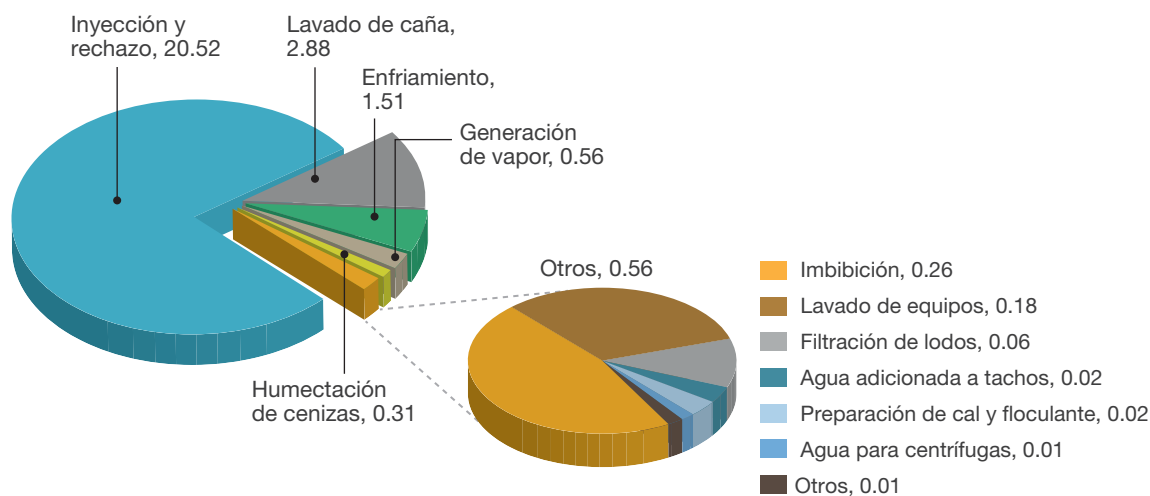


Figura 1. Usos del agua en el proceso industrial sucroenergético (m³/t caña). Ingenio piloto (Cenicaña, 2016).

El segundo lugar de importancia del agua en el proceso fabril del azúcar es su uso como medio diluyente, ya sea para labores de limpieza o para preparación de insumos químicos (13% del uso total). En este ítem el lavado de la caña puede representar hasta el 11% del uso del agua. No obstante, valga anotar que esta labor de lavado tiende a ser cada día menor, dado el aumento de la cosecha mecanizada y los efectos del lavado en las pérdidas de sacarosa en caña corta.

Y finalmente, un bajo porcentaje del agua (1% del total) se destina a usos menores, básicamente para cubrir los requerimientos de los servicios y para el consumo.

Eventualmente es necesario reponer agua en los circuitos cerrados cuando por su calidad no es posible recircularla.

Por supuesto, en los circuitos abiertos y en las actividades que lo demanden el flujo de agua debe ser continuo. Las fuentes de suministro de agua para las fábricas son internas, como es el caso del vapor condensado y recuperado del proceso; y externas, es decir, agua que se capta de fuentes superficiales o subterráneas.

En la composición nominal de la caña que llega a los ingenios para ser procesada, aproximadamente el 70% es agua, parte de la cual es extraída y recuperada como vapor condensado y el resto deja el proceso como una fracción de los productos y subproductos y como vapor que sube a la atmósfera. Cenicaña ha verificado el balance de recuperación de vapor condensado en algunos ingenios piloto, y ha encontrado que entre 20% y 23% del agua que ingresa con la caña y que es recuperada, deja la fábrica como un exceso.

Entre los usos que las fábricas dan al vapor condensado está la reposición de agua a las calderas para generar vapor de alta presión, la extracción de la sacarosa en los molinos (imbibición), la filtración de los lodos que son retirados del jugo para recuperar la sacarosa, y la preparación de insumos químicos.

Por otro lado, el agua captada de fuentes externas es utilizada para reponer la que se pierde en los circuitos cerrados de enfriamiento, como torres y piscinas; para reponer igualmente la que se diluye en el circuito de generación de vapor; para lavado y limpieza de equipos; para su uso en fábrica y como agua de consumo una vez potabilizada. Hacia 2013 el volumen de agua captada de fuentes externas por los ingenios del valle del río Cauca era alrededor de 1.41 m³ por cada tonelada de caña molida. En las cinco destilerías de etanol que operaban entonces, la captación de agua era cercana a 10.75 m³ por cada metro cúbico de etanol producido.

Como es de suponer, el seguimiento de los consumos de agua en las fábricas de azúcar y en las destilerías tiene cada vez más importancia. Actualmente la mayoría de los ingenios cuentan con instrumentación para medir en línea tanto el caudal de agua captada como el caudal de agua vertida. Las tecnologías más utilizadas a este respecto en canales abiertos involucran medidores ultrasónicos de nivel instalados sobre vertederos o canaletas calibrados previamente. En las tuberías de bombeo se han implementado dispositivos magnéticos invasivos, tipo sonda, que permiten medir continuamente el flujo de agua que ingresa a la fábrica. Estas herramientas han aumentado la confiabilidad de las mediciones y garantizado que se suplan las necesidades de agua de la fábrica sin incurrir en una mayor captación, con el consiguiente menor consumo de energía necesaria para bombearla.

Al igual que en el campo, en la fábrica el agua cumple funciones de alta importancia, y su deficiente suministro es un factor limitante en la operación fabril porque es el insumo principal de procesos fundamentales como la generación de vapor, entre otros.

Manejo de efluentes

El manejo de los efluentes en las plantas de azúcar y etanol se orienta por los siguientes criterios:

- **Uso eficiente del agua:** con lo cual se busca reducir el consumo de agua proveniente de fuentes externas y disminuir en igual proporción el caudal efluente.
- **Producción limpia:** controlando los procesos que tienen influencia directa sobre la contaminación del agua, de forma que se pueda maximizar su reúso y reutilización sin necesidad de tratamiento previo.
- **Recolección y conducción:** a través de infraestructura que permita reducir la contaminación difusa cuando la calidad del agua ha sido afectada y pueda llevarse el líquido hasta sistemas de tratamiento centralizados.
- **Tratamiento, reúso y reutilización:** con base en sistemas que permitan mejorar la calidad del agua hasta el punto establecido para su reúso o reutilización en procesos industriales o en el campo.
- **Disposición final:** cumpliendo con la normatividad vigente para el vertimiento de agua residual en fuentes superficiales de agua.

Se estima que el caudal de agua que vierten las fábricas de azúcar y de etanol es de 0.5 m³/t de caña procesada y 5.16 m³/m³ de etanol producido. Esto equivale a 44% y 47% del volumen de agua captado por cada unidad productiva, respectivamente. La principal contribución al efluente que surge de la fábrica de azúcar proviene del área de elaboración, mayormente por el lavado de superficies y de los equipos durante su mantenimiento, y por reboses o fugas de materiales de proceso. En segundo lugar se encuentran los reboses de la piscina de enfriamiento.

Tanto los efluentes de la fábrica de azúcar como los de la destilería son orgánicos, dado que están compuestos principalmente por materiales de la caña que han experimentado transformaciones en el proceso de producción. La mayoría de ellos son azúcares, ácidos orgánicos y alcoholes. Esta característica hace que los efluentes sean altamente biodegradables, razón por la cual los sistemas de tratamiento biológico son los más idóneos para mejorar su calidad. Pero además se utilizan otros sistemas para pretratar los efluentes y remover de ellos sólidos gruesos y material sedimentable, así como grasas y aceites que puedan contaminar el agua y perjudicar el desempeño de los microorganismos presentes en los sistemas de tratamiento biológico.

Entre los sistemas que utilizan las fábricas de azúcar y las destilerías para tratar los efluentes están:

- Lagunas de sedimentación
- Lagunas de oxidación (aerobias, anaerobias y facultativas)
- Clarificadores
- Trampas de grasa
- Reactores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)
- Sistemas de lodos activados

Tanto los efluentes de la fábrica de azúcar como los de la destilería son orgánicos, dado que están compuestos principalmente por materiales de la caña que han experimentado transformaciones en el proceso de producción. La mayoría de ellos son azúcares, ácidos orgánicos y alcoholes.

Compromisos del sector con la gestión del agua residual

La crisis hídrica ocupa el quinto lugar en la lista de los diez riesgos más importantes que pueden afectar a la humanidad, según señala el Reporte de Riesgos Globales publicado por el Foro Económico Mundial (World Economic Forum, 2018). Este riesgo se define como “una disminución significativa en la cantidad y calidad de agua dulce disponible, lo que produce efectos perjudiciales para la salud humana o la actividad económica”, con lo cual se reconoce que los efectos de la crisis del agua están estrechamente interconectados con otras categorías de riesgo y pueden exacerbar las de tipo económico, geopolítico y social.

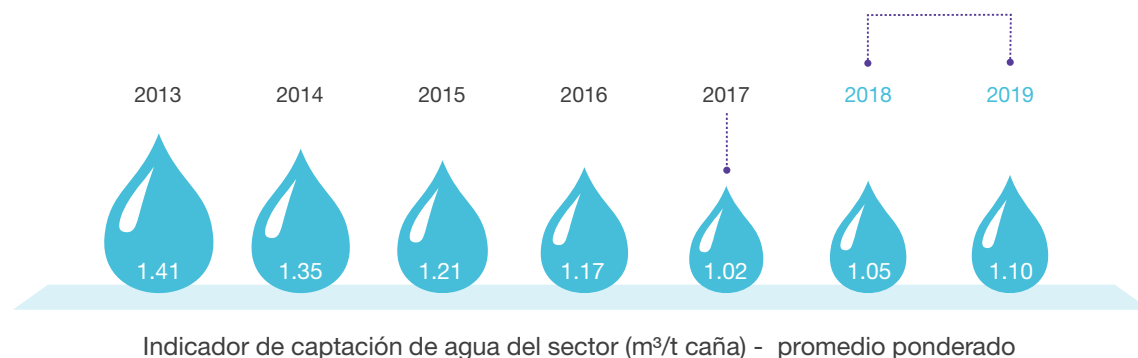
Esto significa que una inadecuada gestión del recurso hídrico puede producir impactos negativos en las tres esferas de la sostenibilidad. Por un lado, representa un riesgo para las empresas, ya que el agua es un insumo vital para muchos procesos industriales y comerciales; y, asimismo, es un factor que contribuye a la definición de la imagen corporativa y su competitividad. En el aspecto social, el impacto negativo de la falta de agua se reflejará en daños a la salud por agua no apta para su consumo o por falta de acceso a ella, así como en conflictos entre las comunidades y los sectores industriales y comerciales. En cuanto al ambiente, los efectos de la reducida oferta de agua inciden directamente en la pérdida de la biodiversidad y el consecuente colapso de los ecosistemas.

En este contexto y con el compromiso de garantizar la sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar, a mediados de 2013 inició labores el grupo de trabajo “Mesa del Agua para Fábrica” –conformado por representantes de los 13 ingenios azucareros del valle del río Cauca (12 a partir de 2017)– en áreas relacionadas con el manejo del agua y la gestión ambiental, con el apoyo de Cenicaña. La Mesa del Agua para Fábrica propugna el establecimiento de planes y el cumplimiento de metas conducentes al uso racional y sostenible del agua, con el objetivo prin-

cipal de reducir su consumo y aumentar el reúso y reutilización en los procesos fabriles.

Entre las realizaciones de la Mesa del Agua para Fábrica vale destacar las siguientes:

- El establecimiento del Balance Hídrico Industrial, una metodología para medir y controlar los consumos de agua en la fábrica, reducir sus pérdidas, maximizar su potencial de reúso y disminuir los vertimientos líquidos.
- El fortalecimiento de la cooperación técnica entre las fábricas de azúcar, las destilerías y Cenicaña, traducido en resultados satisfactorios, como lo muestran numerosos casos exitosos. Además, el enfoque de la investigación que propicia Cenicaña ha dado un valor agregado a la gestión del agua, ya que el análisis integral de la materia ha puesto de relieve los beneficios que esto comporta en el proceso de producción. En ese sentido, se ha identificado que controlando las variables de operación es posible reducir las pérdidas de sacarosa, que a su vez contribuyen a la contaminación orgánica presente en algunos efluentes de la fábrica. De igual manera, se ha cuantificado el ahorro energético por la reducción del bombeo de agua y se han desarrollado trabajos para disminuir el consumo de insumos para tratar el agua.
- La reducción de la captación de agua desde fuentes externas: de 1.41 m³/t caña en 2013 a 1.02 m³/t caña en 2017. Cabe destacar que los indicadores de 2018 y 2019 son significativamente mayores que los registrados en 2017. Esto refleja, por un lado, volúmenes de agua captada iguales a los del año precedente pero afectados por una menor tasa de molienda; por otro lado, el efecto de los cambios tecnológicos para medir el agua captada y la requerida por los diferentes procesos. Esto ha permitido conocer con mayor grado de confiabilidad los volúmenes de agua utilizados, así como fortalecer los procesos de gestión del recurso y las estrategias de reducción de su consumo (Figura 2).



* Diferencia significativa en 2018 y 2019 con respecto a 2017.

Figura 2. Evolución del indicador sectorial de captación de agua en las fábricas de azúcar (m³/t caña).

Entre las acciones implementadas por los ingenios para reducir la captación de agua se encuentran:

- La puesta en marcha y el acondicionamiento de torres de enfriamiento para incrementar el uso de vapor condensado y recuperado en el proceso, de forma que se reduzca el requerimiento de agua cruda captada de fuentes externas.
- El desarrollo de programas de disminución del consumo de agua en labores de limpieza y lavado de equipos (con el uso de agua a alta presión y lavando el piso en seco).
- El mejoramiento del sistema de sellos húmedos para coleccionar cenizas en las calderas, y el cambio tecnológico hacia sistemas de evacuación en seco.
- El mantenimiento y limpieza de las piscinas de enfriamiento, para disminuir la reposición de agua proveniente de fuentes externas.
- La implementación de herramientas para medir los consumos de agua y asegurar su confiabilidad.

Es bien sabido que con el propósito de fortalecer las prácticas de manejo racional del agua y mitigar los impactos negativos derivados de su uso impropio, existe una creciente tendencia mundial a demandar herramientas que permitan cuantificar los impactos actuales y potenciales sobre el recurso hídrico de las empresas que de él se benefician. En Colombia el sector agroindustrial de la caña de azúcar no ha sido ajeno a este reclamo, que llevó a Cenicaña a promover la adopción de metodologías con validez internacional para satisfacer las razonables inquietudes de una y otra parte. En este contexto, indicadores como la 'huella hídrica' y la 'huella de agua' han cobrado importancia en la evaluación del uso y consumo de agua, y representan nuevas y valiosas herramientas para mejorar la gestión del agua en el sector agroindustrial de la caña de azúcar en el valle del río Cauca.

El concepto de huella hídrica, divulgado por primera vez en 2002, se concibió como una herramienta para estimar el contenido de agua oculta en cualquier bien o servicio consumido por un individuo o grupo en un área específica.

La huella hídrica: origen del concepto, enfoques y metodologías

El concepto de huella hídrica, divulgado por primera vez en 2002 (Hoekstra & Hung, 2002), se concibió como una herramienta para estimar el contenido de agua oculta en cualquier bien o servicio consumido por un individuo o grupo en un área específica. Desde entonces el concepto ha ganado interés y sus alcances se han extendido a otros aspectos espacio-temporales. La evaluación de la huella hídrica engloba actividades que van desde: (i) cuantificar y ubicar la huella hídrica de un proceso, producto, productor o consumidor y cuantificar en tiempo y espacio la huella hídrica de un área geográfica específica; (ii) evaluar la sostenibilidad ambiental, social y económica de la huella hídrica; y (iii) formular una estrategia de respuesta.

En los procesos industriales y comerciales y sus productos o servicios derivados, la huella hídrica es un indicador del uso y consumo del agua a lo largo de la cadena de suministro y representa la cantidad de agua dulce requerida directa o indirectamente para producir dichos bienes o prestar dichos servicios.

Para promover la adopción de la huella hídrica como un indicador fiable para evaluar la sostenibilidad del consumo y uso del agua, se creó en 2008 la Red de la Huella Hídrica, WFN (sigla en inglés, *Water Footprint Network*). En tal sentido, la WFN propone reforzar esta metodología con tres componentes: las huellas hídricas verde, azul y gris. A continuación se definen estos conceptos:

-  **Huella hídrica verde:** el volumen de agua lluvia consumido por el cultivo y que no se convierte en escorrentía.
-  **Huella hídrica azul:** el volumen de agua dulce extraído para su uso en el proceso productivo y que no es retornado a la fuente de origen.

-  **Huella hídrica gris:** el volumen de agua requerido para la dilución de un contaminante específico de tal forma que no afecte la calidad del cuerpo receptor.

Visto así, la huella hídrica de un producto o servicio será igual a la suma de los tres componentes anteriores y la huella hídrica indirecta, asociada esta última al importe de agua virtual a través de materias primas y bienes consumidos en el proceso.

La huella hídrica es, entonces, una medida volumétrica del consumo y contaminación del agua, mas no una medida de la gravedad de su impacto ambiental local. Como respuesta a esta limitación surgió el concepto de ‘huella de agua’, desarrollado como norma internacional ISO 14046:2014 “Gestión Ambiental - Huella de agua - Principios, requisitos y directrices”, en el marco de las normas internacionales ISO 14040 (ISO 14040, 2006) e ISO 14044 (ISO 14044, 2006) sobre Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El objetivo de la huella de agua es, entonces, cuantificar los impactos potenciales del uso del agua en el ciclo de vida de un producto, tanto en los ecosistemas como en la salud humana y en los recursos naturales. De conformidad con la norma ISO 14046, un estudio de huella de agua tiene cuatro fases iterativas e interrelacionadas: definición del objetivo y el alcance, análisis del inventario de la huella de agua, evaluación del impacto de la huella de agua, e interpretación (Figura 3).

Como se ve, los dos enfoques mencionados –huella hídrica y huella de agua– para evaluar el impacto del uso y consumo del agua persiguen objetivos similares; no obstante, sus campos de aplicación dependerán del estudio que se quiera llevar a cabo y del fin que se busque dar a los resultados obtenidos. A pesar de sus diferencias, estas dos metodologías pueden resultar complementarias y su correcta interpretación puede ser de utilidad para la toma de decisiones en su campo de aplicación.

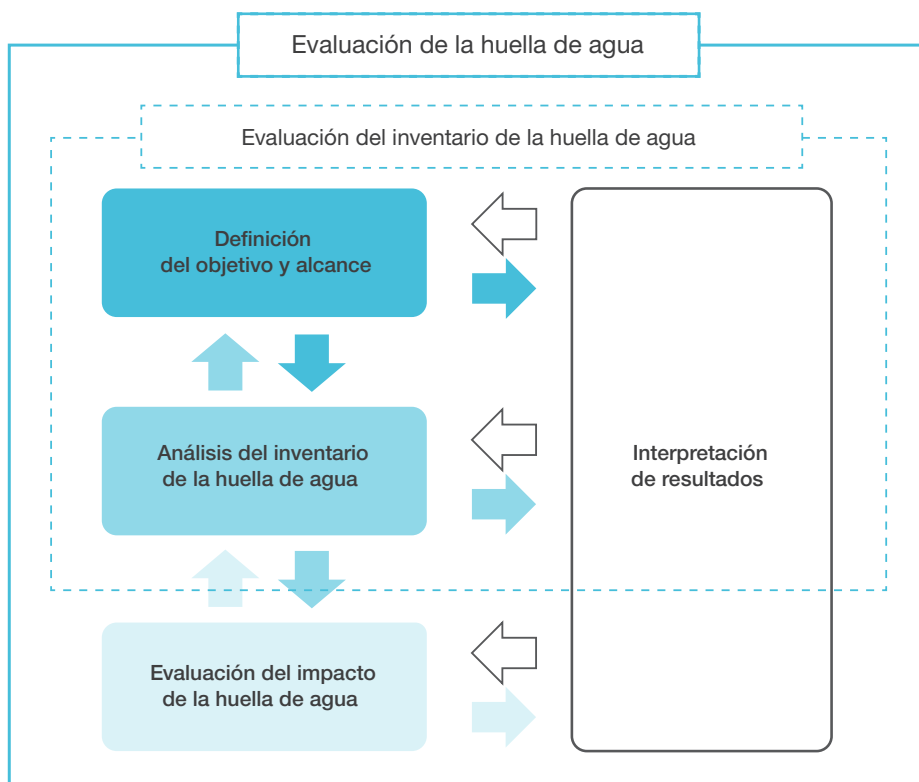


Figura 3. Fases de un estudio de huella de agua. Adaptado de ISO 14046, 2014.

Aproximación a la huella hídrica del sector de la caña en Colombia

Cenicaña se propuso analizar las metodologías más eficaces para estimar la huella hídrica, y reportó positivos resultados con la aplicación de la que postula la WFN.

Para estimar la huella hídrica de la caña de azúcar y sus productos derivados se siguieron los lineamientos descritos como el estándar mundial en el manual de evaluación de la huella hídrica de la WFN (Hoekstra et al., 2009). El alcance del análisis incluyó la huella hídrica directa del sector agroindustrial de la caña de azúcar para el año 2016 en sus tres componentes (verde, azul y gris), con un enfoque ‘de la cuna a la puerta’ para los productos. La metodología de cálculo utilizada estima la huella hídrica global del sector, es decir, considera el cultivo de caña y los procesos industriales como un todo, y distribuye los resul-

tados en los productos con base en un factor de asignación de tipo económico que involucra la fracción de valor económico creada por la cantidad vendida de cada producto.

Como información primaria para estimar el uso consuntivo de agua por el cultivo se utilizaron los datos climatológicos de la Red Meteorológica Automatizada (RMA), administrada por Cenicaña correspondientes al periodo 1996-2016, y se realizó el balance hidrológico de oferta y demanda de agua para riego en una unidad productiva empleando la metodología descrita por Cruz (2015). Para estimar el componente gris durante la etapa de cultivo se acudió a datos obtenidos de siete ingenios sobre la tasa de aplicación de nitrógeno por hectárea fertilizada. En cuanto a la información concerniente al volumen de agua captada para los procesos industriales, fue extraída de los reportes de la Mesa del Agua para Fábrica.

Como parámetros de referencia para estimar el componente gris de la huella hídrica se consideraron los límites máximos permisibles por la legislación colombiana para la destinación del recurso hídrico, al igual que los objetivos de calidad de agua propuestos por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) para el río Cauca.

La información relativa a los indicadores de productividad para campo, fábrica y destilería y

la concerniente a los indicadores ambientales de vertimientos y al comportamiento histórico de los precios del azúcar y el etanol, fue consultada en Asocaña (2017).

Para efectos de comparar sus resultados con otras experiencias internacionales, el estudio de Cenicaña se enfocó solo en la huella hídrica directa, dado que los valores de referencia son producto de estudios con el mismo alcance. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.

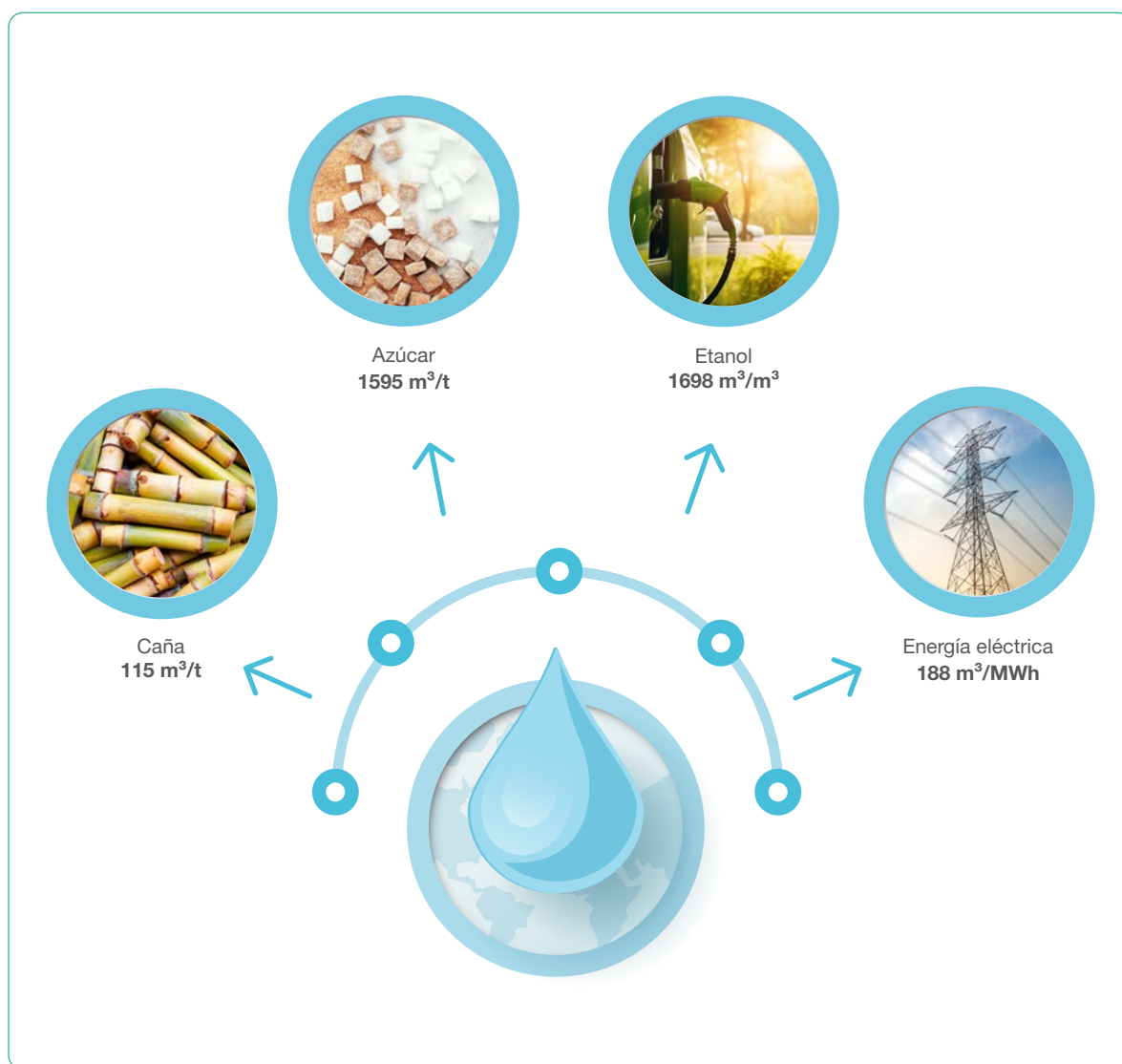


Figura 4. Huella hídrica directa de la caña de azúcar y sus productos derivados.

Al comparar los resultados obtenidos en Colombia versus el promedio global ponderado de la huella hídrica para la caña de azúcar y sus productos derivados estimado por Gerbens-Lee-nes y Hoekstra (2009), y las conclusiones de estudios realizados en Brasil con igual propósito (Scarpore et. al., 2016; Chico et. al., 2015), se observa que los valores son cercanos en cuanto a los productos de Brasil, pero distan significativamente del panorama global. La **Figura 5** presenta los valores comparados para la huella hídrica de la caña de azúcar y dos productos de los que se tiene referencia. Se excluye de la comparación el componente gris de la huella hídrica de los procesos industriales en cada caso, ya que en los estudios utilizados como referencia no se incluyó el análisis de esta fracción. Dos factores principales pueden influir en los resultados de esta comparación: los requerimientos hídricos del cultivo y el rendimiento en toneladas de caña por hectárea. Los altos tonelajes del cultivo de caña de azúcar en Colombia en comparación con Bra-

sil y el promedio global, resultan en una huella hídrica baja por cada tonelada de caña producida. Y dado que la caña de azúcar es el producto primario de la agroindustria, la huella hídrica de sus productos derivados será, en consecuencia, también baja. Este resultado permite inferir que la industria azucarera colombiana usa eficientemente el agua, ya que pese a que en Brasil el riego no es una práctica habitual su huella hídrica sigue siendo mayor.

La metodología utilizada para determinar el requerimiento de agua del cultivo influye significativamente en el resultado de la huella hídrica. En el ejercicio realizado por Cenicaña la información climática local estuvo disponible y fue factible utilizar una metodología específica para estimar la evapotranspiración del cultivo en las condiciones del valle del río Cauca, mientras que en los estudios que tomó como referencia se usaron bases de datos globales, como CLIMWAT 2.0 y FAOSTAT, y modelos como CROPWAT.

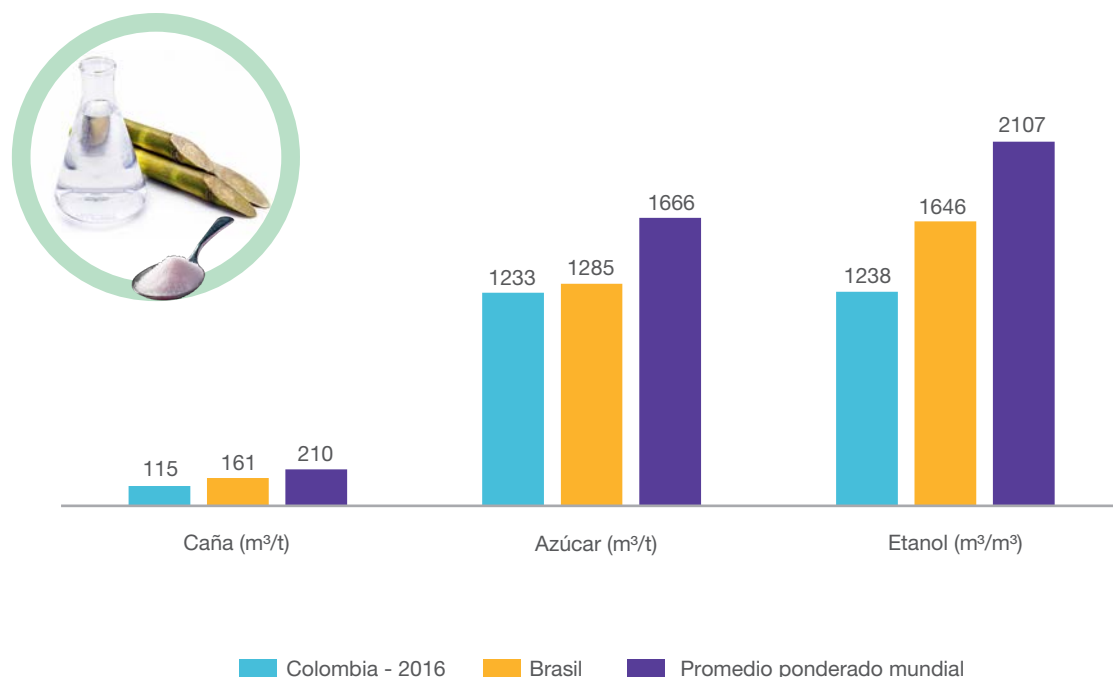


Figura 5. Comparación de la huella hídrica directa de la caña de azúcar y sus productos derivados.

Cuando se analizan las fracciones de la huella hídrica es importante tener en cuenta que la huella hídrica gris es un volumen virtual o implícito, mientras que los componentes verde y azul indican el impacto tangible del uso consuntivo del agua. En síntesis, la huella hídrica verde representa el 52% de la huella hídrica en la etapa de campo y el 38% de la huella hídrica total del sector productivo. Esto ilustra la importancia del flujo vertical de agua para el cultivo de caña de azúcar en la región y su papel en el uso eficiente del recurso hídrico proveniente de fuentes superficiales y subterráneas. La huella hídrica azul, por su parte, representa el 35% de la huella hídrica en la etapa de campo y el 26% de la huella hídrica total del sector.

Con respecto a la huella hídrica gris, se evidenció que la mayor contribución a este indicador son los procesos industriales, que representan un 72% de la huella hídrica gris total. En el análisis de la huella hídrica total del sector,

la huella hídrica gris representa el 36%. Cabe destacar que este resultado es producto de la estimación del impacto ambiental generado por la lixiviación y escorrentía de una fracción del nitrógeno aplicado en campo, así como el vertimiento de los procesos fabriles a fuentes superficiales de agua, este último en términos de la demanda bioquímica de oxígeno, DBO_5 (medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días a 20 °C).

A pesar de que el mayor impacto en los procesos fabriles está dado por el componente gris de la huella hídrica, hay que reconocer los esfuerzos conjuntos entre los ingenios y cultivadores del sector agroindustrial de la caña de azúcar para reducir el consumo de agua dulce en las labores de campo y en los procesos industriales, como ya se mencionó.



Inventario de gases de efecto invernadero y huella de carbono en la cadena agroindustrial de la caña de azúcar

Cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, debe entenderse éste como una variación del sistema climático atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera del planeta y se suma a la variabilidad natural del clima. En el Quinto Informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2013) se establece que “el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y muchos de los cambios observados desde la década de 1950 no han tenido precedentes en décadas o milenios”. Esto lo corroboran los siguientes fenómenos (Figuras 6 y 7):

- La temperatura de la atmósfera se ha elevado notoriamente en los últimos años, a tal punto que el periodo comprendido entre 1983 y 2012 ha sido probablemente el más cálido en los últimos mil cuatrocientos años.
- El nivel del mar ha subido a razón de 3.2 mm/año entre 1993 y 2010.
- Hay una continua disminución de la extensión de nieve y hielo en la mayor parte del mundo.

Estos cambios se atribuyen al calentamiento global, que en términos corrientes puede entenderse como el incremento gradual de la temperatura del planeta debido principalmente al aumento de la concentración en la atmósfera de algunos gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono, emitidos por la acción humana. Estos gases impiden que los rayos del Sol salgan de la Tierra y pueda mantenerse una tem-

peratura adecuada para la vida. Y a medida que aumenta la concentración de este tipo de gases en la atmósfera se retiene una mayor proporción de los rayos infrarrojos, lo que eleva la temperatura del planeta.

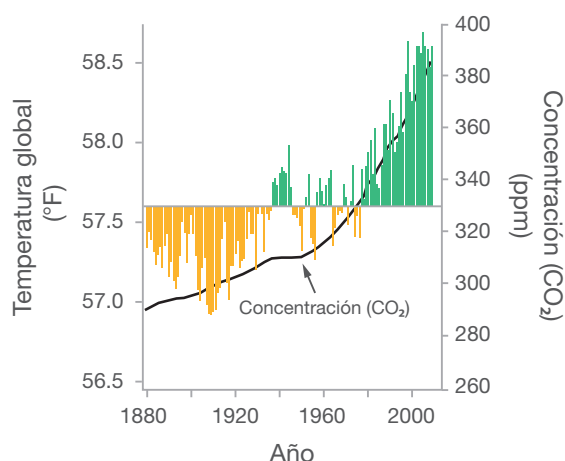


Figura 6. Temperatura global vs. Concentración de CO₂ en la atmósfera (NOAA, 2015).



Figura 7. Cambios observados en la superficie glaciar en el volcán Nevado del Ruíz (IDEAM et al., 2017).

Los gases de efecto invernadero considerados en el protocolo de Kyoto, firmado por los 34 países más industrializados y la Unión Europea en 1997, son los siguientes:

- **Dióxido de carbono (CO_2):** emitido, por ejemplo, en la combustión de combustibles fósiles.
- **Metano (CH_4):** emitido en la descomposición biológica de materia orgánica, entre otros procesos.
- **Óxido nitroso (N_2O):** emitido, por ejemplo, en los cultivos agrícolas debido a la aplicación de fertilizantes nitrogenados.
- **Hexafluoruro de azufre (SF_6):** contenido en interruptores de alta potencia, entre otros.
- **Gases hidrofluorocarbonados y perfluorocarbonados (HFC y PFC):** gases refrigerantes que utilizan los aires acondicionados y los sistemas de refrigeración.

Una de las estrategias para enfrentar el cambio climático es la mitigación. Para este fin, en 2015,

durante la COP 21, se firmó el acuerdo de París que compromete a los 196 países signatarios de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) –a la cual adhirió Colombia en 1994– a tratar de “mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y a proseguir los esfuerzos para reducir ese aumento de la temperatura a 1.5 °C con respecto a los mismos niveles, porque se acepta que ello reducirá considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático”.

Colombia es responsable del 0.46% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (año base 2010), y se calcula que si no se toman medidas esta cifra se puede elevar un 50%. El sector forestal es responsable del 39% de las emisiones de GEI, principalmente por la deforestación, seguido de las actividades agropecuarias y de transporte, responsables del 19% y del 10% de emisiones, respectivamente (Figura 8). El país se comprometió a reducir 20% de sus emisiones de gases proyectadas a 2030 con medidas de eficiencia energética, innovación tecnológica, cambios de comportamiento y sustitución de combustibles (García Arbeláez et al., 2016).

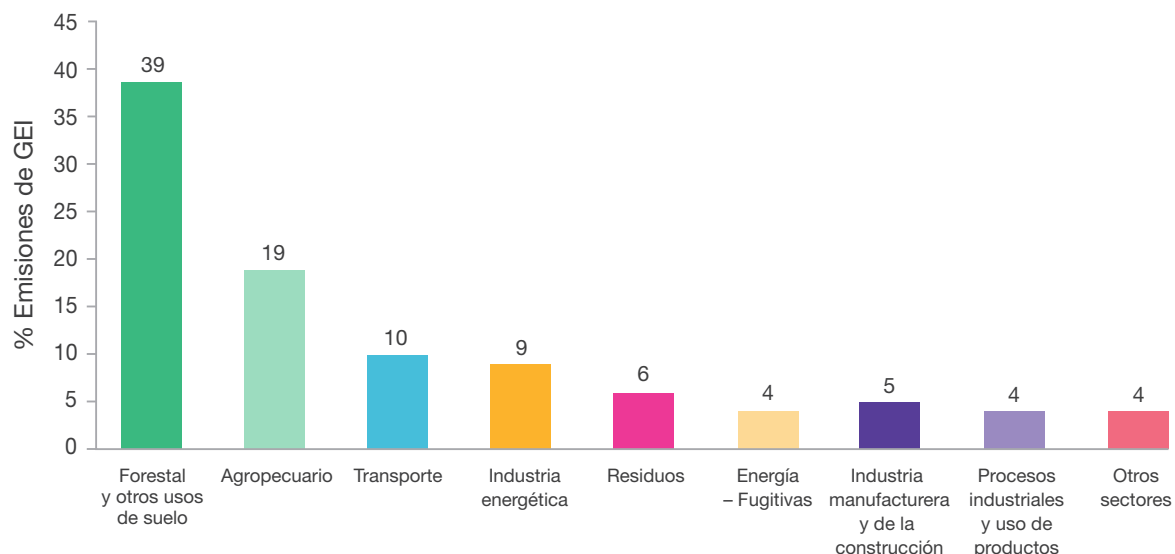


Figura 8. Distribución de emisiones por sector productivo, Colombia 2010. (IDEAM et al., 2015).

Sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia y las emisiones de GEI

El sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia es plenamente consciente de esta realidad mundial y de los compromisos adquiridos por el país para disminuir las emisiones de GEI. Por ello, y reconociendo que la producción de caña y su procesamiento para obtener productos de valor agregado como azúcar, etanol y energía eléctrica, entre otros, impactan en el ambiente debido a los insumos que utiliza, al consumo de combustibles, a las operaciones de procesamiento, etc., ha establecido una línea base de emisiones de GEI.

Es así como desde 2012, con apoyo de Cenicaña, se sentaron las bases metodológicas para establecer el inventario de emisiones de GEI en la producción de azúcar, etanol y demás productos de la agroindustria, con el objetivo de definir la línea base de las emisiones de GEI del sector agroindustrial de la caña de azúcar en Colombia y detectar los puntos críticos y de mayor impacto, para emprender acciones que disminuyan y mitiguen estos impactos ambientales asociados al proceso productivo (Palacios García et al., 2015; Hoefnagels, Smeets y Faaij, 2010; Alverson, 2013).

Metodologías para el cálculo del inventario de GEI y la huella de carbono

Diferentes normas internacionales regulan las metodologías para calcular el inventario de emisiones de GEI y la huella de carbono, entre ellas la norma NTC-ISO 14064-1:2006 “Gases de efecto invernadero. Parte 1: especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero”, y la especificación técnica ISO/TS 14067:2013 “Gases de efecto invernadero - Huella de carbono de productos - Requisitos y directrices para cuantificación y comunicación”. La primera está enfocada en levantar el inventario de las emisiones y

remociones de GEI imputables a una empresa; la segunda busca definir la suma de emisiones y remociones de GEI en un producto, con base en un análisis de su ciclo de vida, considerando como única categoría de impacto el cambio climático.

La metodología seguida para el cálculo de las emisiones de GEI se basa en la NTC-ISO 14064-1, que “detalla los principios y requisitos para el diseño, desarrollo y gestión de inventarios de GEI para compañías y organizaciones, y para la presentación de informes sobre estos inventarios. Incluye los requisitos para determinar los límites de la emisión de GEI, cuantificar las emisiones y remociones de GEI de la empresa e identificar las actividades o acciones específicas de la empresa con el objeto de mejorar la gestión de los GEI”. La norma propone cuantificar las emisiones de GEI por medio de un análisis del inventario de las emisiones de la empresa.

En este orden de ideas, la metodología “Seguida por el sector” contabiliza las emisiones de la empresa según su procedencia, por lo cual se deben definir claramente las áreas de la empresa que conformarán el inventario de la totalidad de las emisiones de GEI. Esta metodología consta de las fases propuestas para realizar un análisis de ciclo de vida que se ilustran en la **Figura 9**.

A partir de las emisiones totales que arroje el inventario de la empresa se calculan las emisiones asociadas a cada uno de los productos o la huella de carbono de cada uno de ellos (azúcar, etanol, bagazo, energía eléctrica, etc.).

La metodología “Seguida por el sector” contabiliza las emisiones de la empresa según su procedencia, por lo cual se deben definir claramente las áreas de la empresa que conformarán el inventario de la totalidad de las emisiones de GEI.

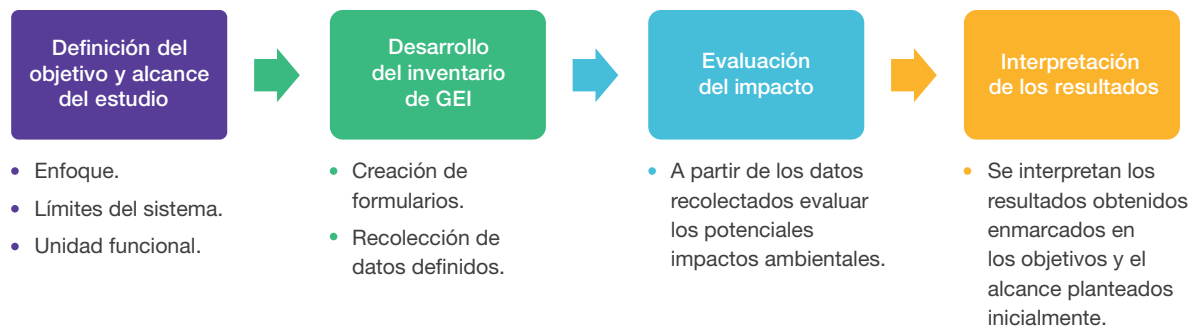


Figura 9. Fases para el desarrollo del inventario de GEI y el cálculo de la huella de carbono.

Enfoque y límites empresariales

Los límites de la empresa para el cálculo del inventario de GEI comprenden todos los procesos involucrados en la producción de los productos y subproductos derivados del aprovechamiento de la caña de azúcar. Así, se definieron dentro de los límites de la sucroindustria las etapas comprendidas entre la siembra de la caña de azúcar hasta el despacho de los productos en la puerta del ingenio, a saber: campo, cosecha, fábrica de azúcar, destilería, gestión energética del proceso industrial y tratamiento de residuos líquidos y sólidos, como lo ilustran las Figuras 10, 11 y 12.

Alcances comprendidos en el inventario

Para cada etapa del proceso mencionada se calcularon las emisiones en los tres alcances establecidos en la norma ISO 14064-1:2006:

- **Alcance 1:** emisiones directas de GEI. Las emisiones directas de GEI provienen de fuentes que son propiedad de la empresa o son controladas por ella; por ejemplo, las emisiones de combustión en calderas, hornos y vehículos, entre otras; las emisiones de procesos químicos en equipos de propiedad de la empresa o controlados por ella. Las emisiones directas de CO₂ procedentes de la combustión de biomasa no se incluyen en el Alcance 1.

- **Alcance 2:** emisiones indirectas de GEI. Se refiere a las emisiones asociadas a la electricidad que se compra o de alguna manera ingresa a los límites de la empresa dado que se producen físicamente en las instalaciones donde se genera la electricidad.
- **Alcance 3:** otras emisiones indirectas de GEI. Esta categoría engloba aquellas emisiones que son consecuencia de las actividades de la empresa pero provienen de fuentes que no son de su propiedad o escapan a su control, tales como la extracción o la producción de materiales que compra y el transporte de combustibles igualmente comprados, así como el uso de los productos y servicios vendidos por ella.

Dentro del alcance 3 se incluyen los siguientes aspectos relevantes en términos de emisiones de GEI:

- Emisiones de N₂O del suelo por la utilización de fertilizantes nitrogenados (cuando son de propiedad y manejo de terceros).
- Emisiones indirectas asociadas a la producción de insumos usados en los procesos agrícolas y fabriles y en su transporte hasta la planta.
- Consumo de combustible y energía eléctrica en las labores agrícolas de preparación del terreno, riego, aplicación de insumos en el campo, cosecha y transporte del cultivo hasta la planta, imputable a los proveedores.

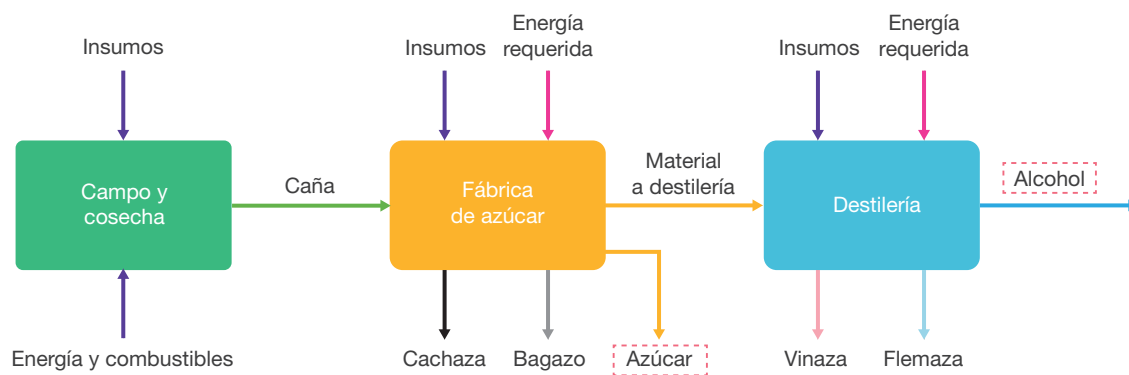


Figura 10. Etapas de campo, cosecha, fábrica de azúcar y destilería para la producción de etanol carburante.

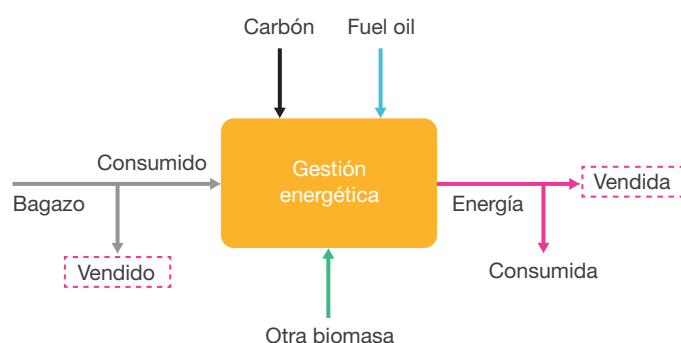


Figura 11. Gestión energética en el proceso de producción de etanol anhidro a partir de caña de azúcar.

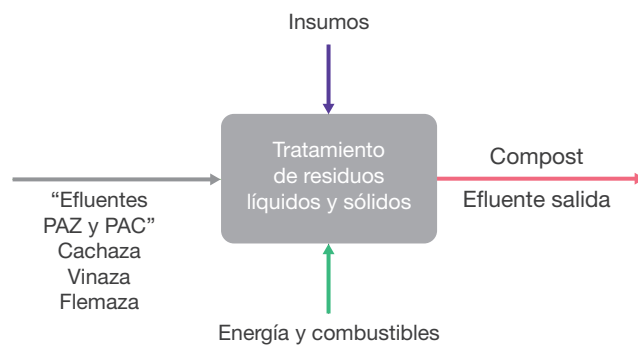


Figura 12. Tratamiento de efluentes en la producción de etanol carburante.

Recolección de información y cálculo del inventario

El sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia ha diseñado formatos específicos para cada una de las etapas del proceso incluidas dentro de los límites empresariales, para recolectar información sobre consumo de combustibles y energía eléctrica y térmica; uso y transporte de insumos, tratamiento y disposición de residuos, viajes terrestres y aéreos del personal, etc., tanto en labores controladas por el ingenio como en labores realizadas por los proveedores de caña.

Con los datos recolectados se evalúan los potenciales impactos ambientales por emisiones de GEI, para lo cual se multiplican los datos de cada actividad por el factor de emisión. El factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera con la actividad que lo emite. La emisión se expresa con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisión} = \text{Factor de Emisión} \times \text{Tasa de Actividad}$$

$$E = FE \times A$$

La norma NTC-ISO 14064-1 dicta que los factores de emisión o remoción deben:

- Derivarse de un origen reconocido.
- Ser apropiados para las fuentes.
- Ser apropiados para las fuentes y sumideros de GEI involucrados.
- Estar actualizados en el momento de ser cuantificados.
- Tener en cuenta la incertidumbre y producir resultados exactos y reproducibles.
- Ser coherentes con el uso previsto del inventario.

Los factores de emisión utilizados para cuantificar el inventario de GEI se obtienen de tres

fuentes: entidades gubernamentales, bases de datos privadas y libres, y estudios científicos. Estos factores también pueden ser resultado de desarrollos propios con fundamentación científica. Las principales fuentes actuales de información acerca de los factores de emisión son las siguientes:

Gubernamentales nacionales e internacionales:

- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)
- Intergubernamentales:
- Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC)
- Green House Protocol (GHG)
- Bases de datos:
- Ecoinvent
- Agri-footprint
- JRC European Commission

Los resultados del inventario de GEI se expresan, además, en términos de CO₂ equivalente, una unidad que comprende las emisiones de todos los GEI y relaciona el Potencial de Calentamiento Global (PCG) de cada gas con el del CO₂. En otras palabras, el PCG es una medida que relaciona la cantidad de radiación infrarroja que es absorbida por una tonelada de determinado gas durante un tiempo dado y la atrapada por una tonelada de CO₂. Por ejemplo, el metano (CH₄) tiene un PCG 28 veces más elevado que el CO₂; y el óxido nitroso (N₂O), 265 veces (IPCC, 2013).

Como un caso práctico se calcularán las emisiones de GEI asociadas al consumo de 1000 galones de gasolina al año, a partir de los factores de emisión en base energética para la gasolina oxigenada encontrados en la **Tabla 1** (Amell et al., 2016). Los resultados se muestran en el **Cuadro 1** utilizando la siguiente fórmula:

$$\left[66778.4 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{TJ}} \times 40.66 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \times 0.741 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times \frac{3.875 \text{ L}}{1 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ TJ}}{1 \times 10^6 \text{ MJ}} \right] \times 1000 \frac{\text{gal}}{\text{año}} = 7616 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{año}}$$

Tabla 1. Factores de emisión para la gasolina oxigenada (Amell et al., 2016).

	kg CO ₂ /TJ	kg CH ₄ /TJ	kg N ₂ O/TJ	Densidad (kg/L)	PCI (MJ/kg)
Gasolina	66778.4	3	0.6	0.741	40.66

Cuadro 1. Emisiones de GEI de la combustión de 1000 galones de gasolina en un año.

Emisiones de GEI por combustión de 1000 galones de gasolina	kg/año
Dióxido de carbono, CO ₂	7616
Metano, CH ₄	0.37
Óxido nitroso, N ₂ O	0.07
Huella de carbono, CO _{2eq}	7644

Las emisiones biogénicas de CO₂ se deben cuantificar, pero se reportan por separado de las emisiones totales del inventario de GEI. Estas emisiones provienen de la combustión de biomasa, como ocurre al quemar de bagazo en las calderas al quemar la caña de azúcar en pie antes de la cosecha; de la descomposición de la biomasa en el tratamiento de residuos y aguas residuales; y del proceso de fermentación para la producción de alcohol carburante. Las emisiones de metano (CH₄) y de óxido nitroso (N₂O) deben estar incluidas en el inventario total (Environment and Climate Change Canada, 2016).

Asignación a productos

Las emisiones de la empresa se asignan a cada uno de los productos teniendo en cuenta la energía contenida en cada uno de ellos, es decir, resulta de multiplicar el poder calorífico del combustible por la cantidad producida del producto en un tiempo establecido. La huella de carbono de los productos se puede expresar en términos de kg CO_{2eq}/m³ de etanol, toneladas de azúcar, kWh de energía eléctrica y toneladas de bagazo (Figura 13).

Por ejemplo, el porcentaje de asignación energética para el etanol se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ asignación}_{\text{etanol}} = \frac{\text{Poder calorífico etanol} \times \text{Cantidad etanol}}{\sum_{i=1}^4 \text{Poder calorífico producto}_i \times \text{Cantidad producto}_i}$$

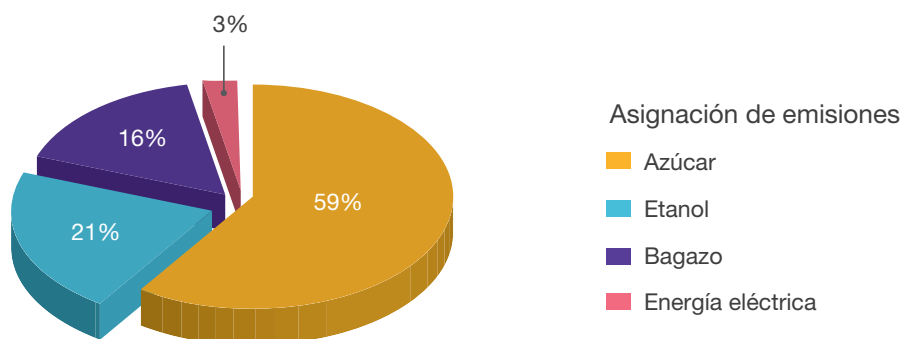


Figura 13. Distribución energética de productos. Los valores varían entre ingenios.

Resultados para la huella de carbono del etanol anhidro combustible para el año 2019

El etanol anhidro combustible, utilizado como oxigenante de la gasolina en Colombia, tiene gran relevancia en el compromiso del país por reducir las emisiones de GEI por su potencial de reducir las que generan los vehículos de combustión interna. Por ello el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución 1962 de 2017, que establece el límite de las emisiones de GEI para la producción del etanol anhidro combustible desnaturalizado (EACD) comercializado en Colombia. El límite que fija la resolución parte de una línea base de 924 kg CO_{2eq}/m³ en 2016 y desciende gradualmente hasta 780 kg CO_{2eq}/m³ en 2021.

En cumplimiento de esta resolución, las seis destilerías de etanol anhidro combustible desnaturalizado del valle del río Cauca y la destilería ubicada en el departamento del Meta, en los Llanos Orientales de Colombia, se certificaron bajo la norma ISO 14064-1, validando así el resultado de la huella de carbono del etanol anhidro combustible y su inventario de GEI empresarial.

El promedio ponderado de los resultados del inventario de GEI de 2019 para las seis destilerías del valle del río Cauca, verificados por una firma internacional, se presentan en la **Figura 14**.

El promedio ponderado de la huella de carbono del EACD para 2019 fue de 581 kg CO_{2eq}/m³, con un valor máximo de 768 kg CO_{2eq}/m³ y un mínimo de 398 kg CO_{2eq}/m³. El consumo de combustibles fósiles y las emisiones debidas a la aplicación de fertilizantes nitrogenados son las actividades que más contribuyen a las emisiones de GEI.

El etanol anhidro combustible, utilizado como oxigenante de la gasolina en Colombia, tiene gran relevancia en el compromiso del país por reducir las emisiones de GEI por su potencial de reducir las que generan los vehículos de combustión interna.

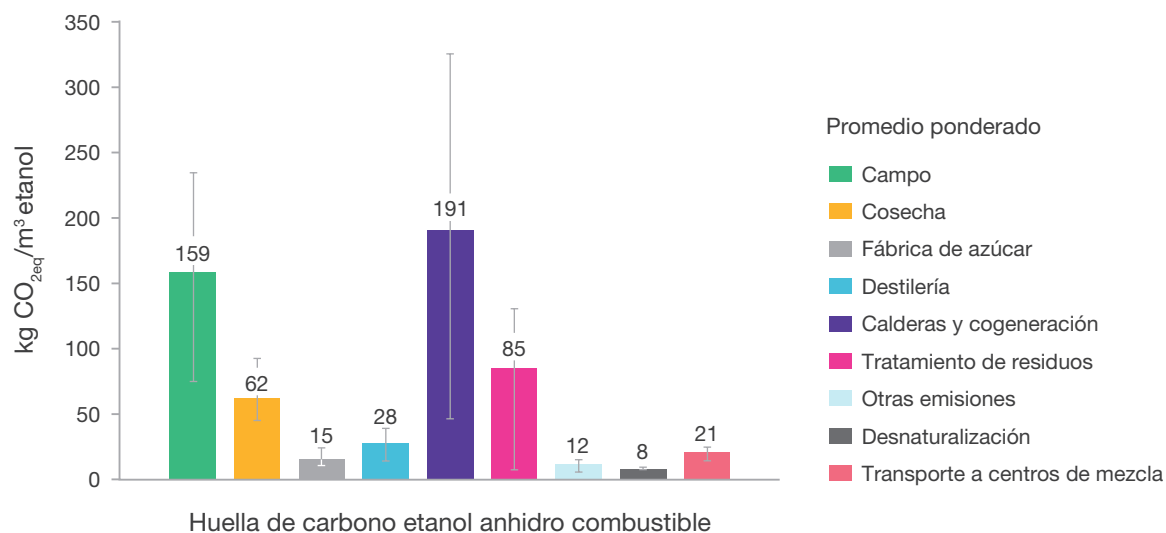


Figura 14. Resultados para la huella de carbono del EACD, año 2019. Barras de error representan máximos y mínimos.

La etapa de calderas y cogeneración es la que más aporta a las emisiones totales del EACD, debido a la combustión del carbón que se intercambia por bagazo con la industria papelera para producir papel. En segundo lugar se encuentra la etapa de campo, en la cual cerca del 38% de las emisiones se deben a la fuga de N_2O del suelo por la aplicación de fertilizantes nitrogenados, y el 17%, a la producción de urea (Figura 15). Ello explica por qué los esfuerzos para reducir las emisiones en esta área están encaminados a disminuir la cantidad de nitrógeno aplicada en el campo. Así es: si se deja de aplicar un bulto (50 kg) de urea por hectárea fertilizada, disminuye la emisión en 136 kg CO_{2eq}/ha , lo que significa una reducción de 1.14 kg CO_{2eq}/t caña, el 6% del total de las emisiones en el campo. La agricultura específica por sitio (AEPS) tiene el potencial de reducir el uso de los diferentes insumos en el campo.

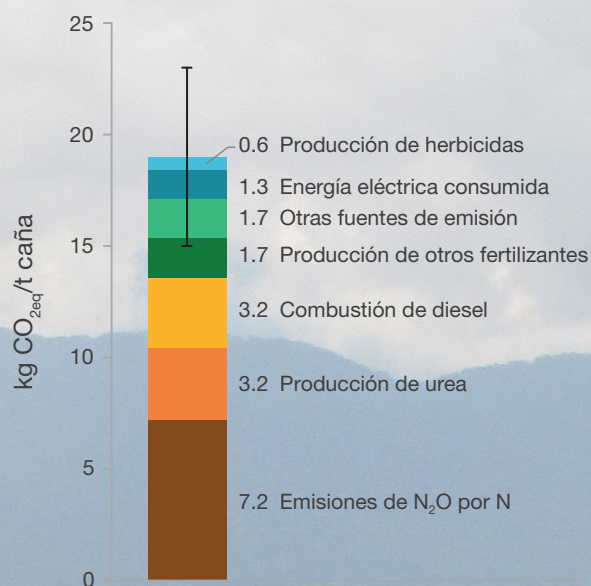


Figura 15. Emisiones de GEL en el campo. Año 2019.



Las principales emisiones de las demás etapas están asociadas con el consumo de combustibles fósiles, como el diésel y la gasolina, el uso de insumos en los procesos y la producción de metano en el tratamiento de los residuos líquidos y sólidos. Valga anotar que entre las acciones emprendidas por el sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, con el apoyo de Cenicaña, para reducir las emisiones de GEI, se encuentra la utilización de vagones de mínimo peso para el transporte de la caña, que permiten disminuir hasta en un 5% el consumo de combustible en este rubro (Bravo et al., 2010), lo que repercute positivamente en la reducción de las emisiones de GEI.

Comparación con los indicadores internacionales

Las principales materias primas para la producción de etanol anhidro carburante son el maíz y la caña de azúcar, cuyos mayores productores mundiales son Estados Unidos y Brasil: 55% y 27%, respectivamente (RFC, 2022). Colombia produce alrededor del 0.36% del etanol anhidro combustible que se produce en el mundo. En la **Figura 16** se puede observar que las emisiones del etanol producido a partir de maíz (Mueller & Unnash, 2016; Alverson, 2013) son significativamente mayores que las del etanol producido a partir de caña de azúcar. De otra parte, las emisiones del etanol

producido en Colombia son similares a las que reporta la literatura para el etanol producido en Brasil (Galdos, et al., 2013; Macedo, Seabra y Silva, 2008; Ecoinvent, 2018). Cabe anotar que los inventarios de emisiones reportados en las referencias bibliográficas consultadas no fueron certificados por una entidad auditora. Estos valores pueden corresponder a los valores promedio de desempeño de la industria en Estados Unidos o Brasil.

La **Figura 16** también muestra el impacto del transporte de etanol hasta Bogotá, según provenga de Minneapolis (EE.UU.), Sao Paulo (Brasil) o Valle del Cauca (Colombia), en las emisiones totales del etanol anhidro combustible. Como se ve, el etanol producido en Colombia tiene un mayor potencial de reducción de las emisiones de GEI en el sector transporte de Colombia, que equivale al 10% de las emisiones totales del país (Ideam et al., 2015).

El sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia seguirá buscando alternativas para mejorar su desempeño ambiental en términos de emisiones de GEI, ajustando los procedimientos para la cuantificación y registro de las emisiones y desarrollando estrategias para su mitigación. Con estas acciones el sector contribuye decididamente a alcanzar la meta de reducción de emisiones de GEI propuestas por el gobierno nacional.

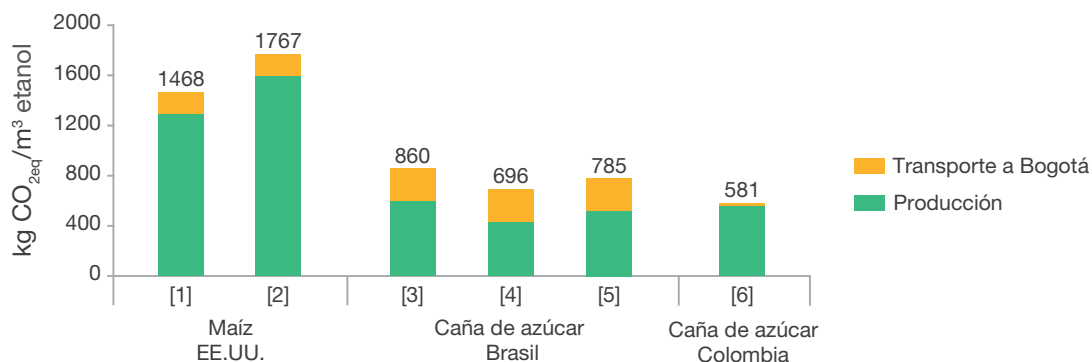


Figura 16. Comparativo de emisiones de GEI para el etanol anhidro combustible. [1] (Mueller y Unnash, 2016); [2] (Alverson, 2013); [3] (Galdos et al., 2013); [4] (Macedo, Seabra y Silva, 2008); [5] Ecoinvent, 2018; [6] Emisiones GEI Etanol Colombia 2019.

Referencias

- Agência Nacional de Águas (ANA), Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp), União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA), Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). (2009). Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética. ANA. 288 p.
- Alverson, R. (2013). "Re-thinking the Carbon Reduction Value of Corn Ethanol Fuel", Ethanol Across America.
- Amell, A.; Chejne, F.; Lopez, D.; Forero, C.; Herrera, B.; Alvarado, P.; Ceballos, C. M.; Giraldo, S. Y.; Porras, J.; Mejía, A. F. y Velasco, F. J. (2016). Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos. Medellín. doi: 10.1016/j.diabres.2013.11.010.
- Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (Asocaña). (2017). Informe anual 2016-2017. <https://www.asocana.org/modules/documentos/14140.aspx>.
- Bravo, J. E.; Estrada Bedón, A.; Gómez Perlaza, A. L.; Isaacs Echeverri, C. H.; Castro Fori, P. W. y Bejarano R., L. (2010). Medición experimental y evaluación económica del consumo de combustible en equipos de transporte de caña. Carta Trimestral, Cenicaña, pp. 55–59. https://www.cenicana.org/pdf_privado/carta_trimestral/ct2010/ct1y2_10/ct1y2_2010.pdf
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). (2016) Informe final proyecto de aguas 2016. <http://bibliotecadigital.cenicana.org:8080/handle/item/6408>.
- Chico, D.; Santiago, A. and Garrido, A. (2015). Increasing efficiency in ethanol production: Water footprint and economic productivity of sugarcane ethanol under nine different water regimes in north-eastern Brazil. Spanish Journal of Agricultural Research, 13 (2), p. e1203.
- Cruz Valderrama, J.R. (2015). Balance hidrológico de oferta y demanda de agua para riego en una unidad productiva. En: Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. Cenicaña. Cali, Colombia, p. 60-81.
- Ecoinvent. 2018. Ecoinvent (version 3.5). <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-9-1/>.
- Environment and Climate Change Canada (2016). Technical Guidance on Reporting Greenhouse Gas Emissions. http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/En81-6-2016-eng.pdf.

- Galdos, M.; Cavalett, O.; Seabra, J. E. A.; Nogueira, L. A. H. y Bonomi, A. (2013). Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon emissions. *Applied Energy*, 104 pp. 576–582. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.002.
- García Arbeláez, C.; Vallejo, G.; Higgins, M. Lou y Escobar, E. M. (2016). El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/el_acuerdo_de_paris_frente_a_cambio_climatico.pdf.
- Gerbens-Leenes, P.W.; Hoekstra, A.Y. (2009). The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize. *Value of Water Research Report Series N.º 38*. UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Hoefnagels, R.; Smeets, E. y Faaij, A. (2010). Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (7), pp. 1661–1694. doi: 10.1016/j.rser.2010.02.014.
- Hoekstra, A.Y. & Hung, P.Q. (2002). Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series No. 11*. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Holanda.
- Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya, M.M.; Mekonnen, M.M. (2009). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Water Footprint Network.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP y CANCELLERÍA. (2015). Primer informe bienal de actualización de Colombia ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Bogotá D.C., Colombia. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023423/1_INFORME_BIENAL_ACTUALIZACION.pdf
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP y CANCELLERÍA. (2017). Resumen ejecutivo Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023732/RESUMEN_EJECUTIVO_TCNCC_COLOMBIA.pdf.
- Palacios García, D. et al. (2015). Análisis de ciclo de vida del sector azucarero colombiano como herramienta para determinar sus emisiones de gases de efecto invernadero. X Congreso Tecnicaña 2015, 16 al 18 de septiembre. Cali, Colombia.
- Renewable Fuels Association (RFA). (2022). Annual World Fuel Ethanol Production. World Fuel Ethanol Production by Region. RFA. <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>



LOS AUTORES

Bryan Esteban Múnera Castañeda

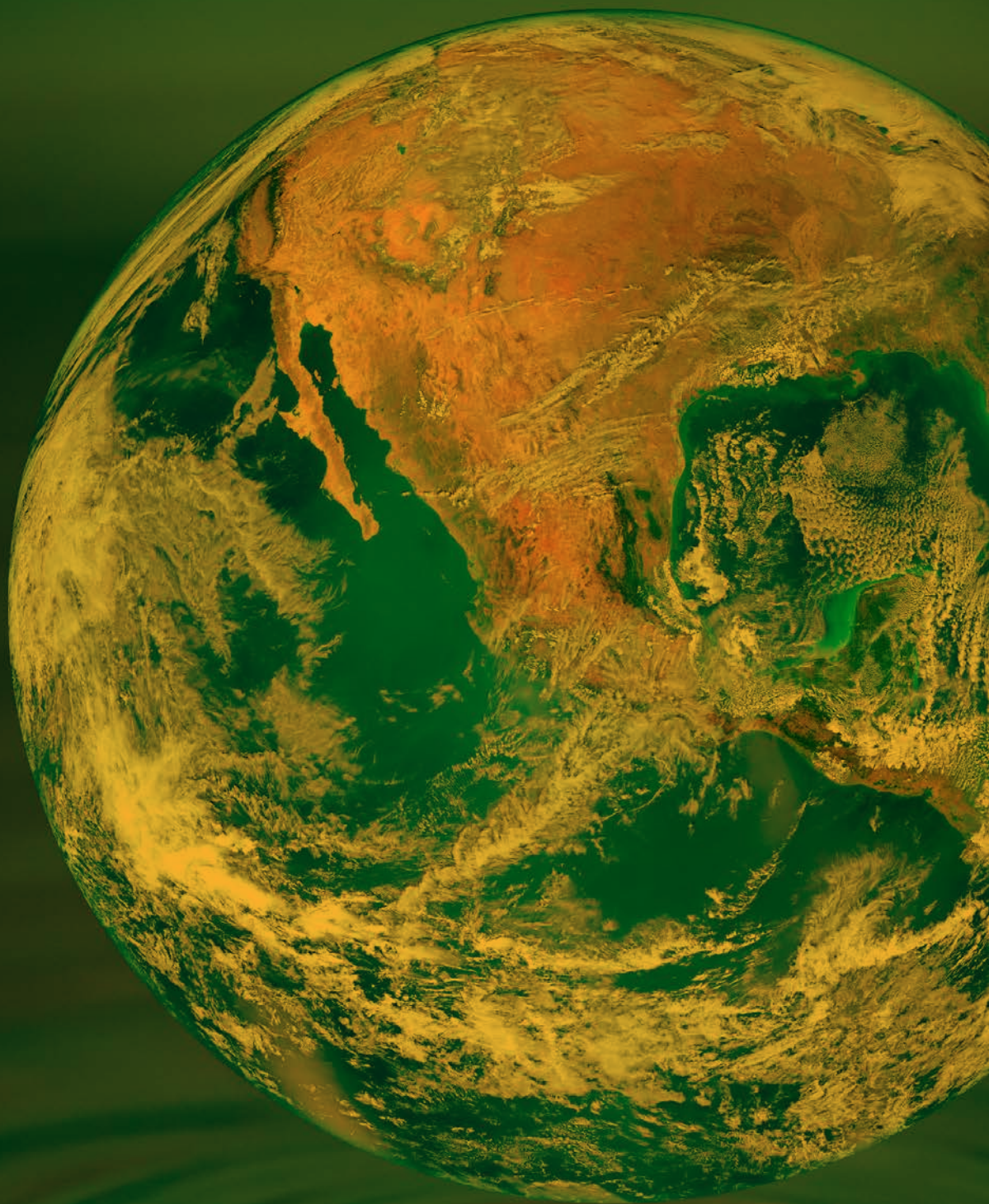
Ingeniero Sanitario y Ambiental, egresado en 2015 de la Universidad del Valle, sede Cali, y estudiante de maestría en Sostenibilidad, en la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín. Cuenta con más de siete años de experiencia en el sector agroindustrial de la caña, específicamente en temas relacionados con sostenibilidad ambiental. Estuvo vinculado durante seis años al Programa de Procesos de Fábrica de Cenicaña, como profesional de ingeniería ambiental, desde donde trabajó y lideró proyectos de investigación en el manejo sostenible del agua en el proceso industrial de la caña, iniciativas de diversificación asociadas con el aprovechamiento de subproductos como la vinaza, la cachaza y las cenizas de combustión, y apoyó la construcción y procesos de verificación de inventarios de gases de efecto invernadero para la producción de etanol anhidro combustible desnaturalizado en las destilerías de la región. Actualmente se encuentra vinculado al Programa Integra, liderado por Cenicaña, donde a través del rol de extensionista ambiental, promueve la adopción de prácticas más sostenibles en el cultivo de caña y la huella de carbono, como indicador de desempeño ambiental y de eficiencia en las unidades productivas de los cañicultores.

David Palacios García

Ingeniero Químico con una maestría en Tecnologías de Energía Sostenible de la Universidad de Twente en los Países Bajos. Desde 2015, ha trabajado como investigador en el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña) donde, desde 2022, se desempeña como coordinador del área de diversificación y sostenibilidad del Programa de Procesos de Fábrica. Su experiencia está relacionada con el desarrollo de indicadores de sostenibilidad para la agroindustria de la caña y la elaboración de inventarios de gases de efecto invernadero. Además, cuenta con experiencia en el aprovechamiento de subproductos de la caña para la generación de productos de valor agregado.

Nicolás Javier Gil Zapata

Director del Programa de Procesos de Fábrica del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, Cenicaña. Cuenta con 33 años de experiencia como investigador en la agroindustria de la caña de azúcar. Experto en incrementar productividad en los procesos sucroquímicos, nuevos productos e indicadores de sostenibilidad. Es ingeniero químico de la Universidad Industrial de Santander y doctor en Ciencias de la ingeniería de Louisiana State University.



Aspectos relevantes
de la sostenibilidad
ambiental
en la cadena productiva
de la caña de azúcar

www.cenicana.org