

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE AZÚCAR BLANCO  
DE REMOLACHA (*Beta vulgaris saccharifera*) EN PLANTA IANSA ÑUBLE  
TEMPORADA 2023: UNA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL CENTRADA EN  
EL CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN ISO 14.044**

**ANGELA LIZBETH VILLABLANCA SOLÍS**

HABILITACIÓN PROFESIONAL  
PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA AMBIENTAL

**CHILLÁN-CHILE**

**2024**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE AZÚCAR BLANCO  
DE REMOLACHA (*Beta vulgaris saccharifera*) EN PLANTA IANSA ÑUBLE  
TEMPORADA 2023: UNA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL CENTRADA EN  
EL CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN ISO 14.044**

Aprobado por:

Christian Correa  
Ingeniero Civil Agrícola Dr.  
Profesor Asociado

---

Profesor Guía

Wilson Esquivel  
Ingeniero Civil Mecánico Dr.  
Profesor Asistente

---

Profesor Co-Guía

David Lara  
Ingeniero Civil Eléctrico Dr.  
Profesor Asociado

---

Profesor Asesor

Marco López  
Ingeniero Civil Industrial Mg.  
Profesor Asistente

---

Director de Departamento (s)

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Profesor Asociado

---

Decana

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS .....	5
2.1. Objetivo general: .....	5
2.2. Objetivos específicos: .....	5
3. ANTECEDENTES GENERALES .....	6
3.1. Análisis de Ciclo de Vida.....	6
3.1.1. Análisis de Ciclo de Vida basado en norma ISO 14.044:2006 .....	6
3.2. El potencial de calentamiento global (GWP) .....	7
4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	12
4.1. Unidad funcional .....	13
4.2. Límite del sistema .....	13
4.3. Análisis de inventario .....	15
4.3.1. Producción de remolacha .....	18
4.3.2. Producción de azúcar blanco de remolacha .....	21

4.3.3. Transporte .....	22
4.4. Evaluación de impacto .....	22
4.5. Asignación .....	23
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	25
5.1. Resultados .....	25
5.1.1. Producción de remolacha .....	25
5.1.2. Producción de azúcar blanco de remolacha .....	26
5.1.3. Transporte .....	28
5.1.4. Evaluación total de la huella de carbono.....	30
5.2.1. Puntos críticos .....	33
5.2.2. Calidad e incertidumbre de los datos .....	33
5.2.3. Transformación energética sostenible en la industria azucarera: Reducción de la huella de carbono mediante la transición de carbón a biomasa.....	34
5.2.4. Recomendaciones .....	35
6. CONCLUSIONES .....	38
7. LITERATURA CITADA .....	39
8. ANEXOS Y APÉNDICES.....	41
8.1. Producción de remolacha.....	41

8.2. Producción de azúcar blanco de remolacha.....	43
8.3. Transporte.....	45
8.4. Reemplazo de carbón por biomasa.....	45
8.5. Capturas de pantalla .....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

En el texto		Página
Tabla 1.	Resumen de datos de análisis de inventario para el proceso productivo de azúcar blanco de remolacha temporada 2023.....	17
Tabla 2.	Consumo energético estimado por hectárea de riego en Agrícola Terrandes temporada 2022-2023.....	20
En el Anexo		Página
Tabla A1.	Cantidades requeridas para la producción de 1 kg de remolacha azucarera.....	42
Tabla A2.	Co-productos generados en la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha.....	43
Tabla A3.	Entradas y salidas para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha.....	44
Tabla A4.	Transporte de insumos, materia prima y azúcar blanco.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto		Página
Figura 1.	Análisis de Ciclo de Vida para el proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con distribución a Santiago Centro.....	14
Figura 2.	Diagrama del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha.....	16
Figura 3.	Contribución de las distintas prácticas agrícolas a la huella de carbono de producción de remolacha.....	26
Figura 4.	Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la etapa de producción de remolacha.....	26
Figura 5.	Contribución de la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha a la huella de carbono.....	27
Figura 6.	Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha.....	28
Figura 7.	Contribución de la etapa de transporte a la huella de carbono.....	29
Figura 8.	Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la etapa transporte.....	29
Figura 9.	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Análisis de Ciclo de Vida de 1 kg azúcar blanco de remolacha 2023.....	31
Figura 10.	Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Análisis de Ciclo de Vida de 1 kg azúcar blanco de remolacha temporada 2023.....	31
En el anexo		
	Página	
Figura 11.	Datos de entrada y salida al software openLCA para la producción de 1 kg de remolacha.....	46
Figura 12.	Emisiones de GEI para la producción de 6,76 kg de remolacha obtenidas en software openLCA.....	47

Figura 13.	Datos de entrada y salida al software openLCA para la producción de 1 kg azúcar blanco de remolacha.....	47
Figura 14.	Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha.....	48
Figura 15.	Datos de entrada al software openLCA para el transporte.....	48
Figura 16.	Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA para el transporte.....	48
Figura 17.	Entradas para el cálculo en el software openLCA del proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha.....	49
Figura 18.	Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA del proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha...	49
Figura 19.	Datos de entrada y salida al software OpenLCA para la producción de 1 kg azúcar blanco de remolacha reemplazando el carbón de caldera por biomasa.....	50
Figura 20.	Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA del proceso de producción de azúcar blanco de remolacha reemplazando el carbón de caldera por biomasa.....	50
Figura 21.	Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA del proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo del carbón de caldera por biomasa.....	51
Figura 22.	Entradas y salidas en software openLCA para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo de todo el carbón por biomasa.....	51
Figura 23.	Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo de todo el carbón por biomasa.....	52
Figura 24.	Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA del proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo de todo el carbón por biomasa.....	52

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE AZÚCAR BLANCO DE REMOLACHA (*Beta vulgaris saccharifera*) EN PLANTA IANSA ÑUBLE TEMPORADA 2023: UNA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL CENTRADA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN ISO 14.044**

LIFE CYCLE ANALYSIS OF THE WHITE SUGAR PRODUCTION PROCESS OF BEET SUGAR (*Beta vulgaris saccharifera*) AT IANSA ÑUBLE PLANT, SEASON 2023: AN ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT FOCUSED ON CLIMATE CHANGE ACCORDING TO ISO 14,044.

**Palabras claves:** Huella de carbono, industria azucarera, reducción de emisiones.

**RESUMEN**

Este estudio aborda una evaluación del impacto ambiental asociado con el proceso productivo de azúcar blanco de remolacha en la planta IANSA Ñuble, Chile, siguiendo la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a la norma ISO 14.044. Se cuantificó las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), a lo largo de las etapas productivas, desde el cultivo hasta la distribución final del producto en la temporada 2023. La huella de carbono total del proceso productivo es 1,617 kg CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco, de los cuales un 73% provienen del proceso en fábrica y un 19% de la producción de remolacha. Mediante la caracterización de las principales fuentes de GEI, se determinó que los de mayor relevancia son: consumo de carbón con un 90,3% de la huella en fábrica, y el uso de fertilizantes nitrogenados con un 37,3% en el cultivo, concluyendo así, que la implementación de prácticas más sostenibles, cómo la sustitución del carbón por otras fuentes energéticas como biomasa, resulta en reducciones significativas de la huella de carbono.

**LIFE CYCLE ANALYSIS OF THE BEET WHITE SUGAR PRODUCTION PROCESS (*Beta vulgaris saccharifera*) AT IANSA ÑUBLE PLANT SEASON 2023: AN ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT FOCUSED ON CLIMATE CHANGE ACCORDING TO ISO 14,044**

**Keywords:** Carbon footprint, sugar industry, emission reduction.

**ABSTRACT**

This study addresses an environmental impact assessment associated with the production process of white beet sugar at the IANSA-Ñuble plant in Chile, following the life cycle analysis (LCA) methodology in accordance with ISO 14,044. Focusing on the 2023 beet season, greenhouse gas (GHG) emissions are quantified throughout all production stages, from cultivation to final distribution of the product. The total carbon footprint of the entire white sugar production process is 1.617 kg of CO<sub>2</sub> equivalent per kilogram of white sugar, of which 73% comes from the factory process and another 19% from beet production. By identifying and quantifying the main sources of GHGs, coal consumption, which represents 90.3% of the factory footprint, and the use of nitrogen-based fertilizers, which represents another 37.3% of the crop, were identified as critical points. Accordingly concluding that the implementation of more sustainable practices, such as replacing coal with other energy sources such as biomass, results in significant reductions in the carbon footprint.

## 1. INTRODUCCIÓN

La especie humana ha provocado desde su origen grandes impactos en el medio ambiente, sin embargo, en el último siglo se ha generado un acelerado avance del calentamiento global, el cual se ha intensificado debido a la producción de gran cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEI) entre los cuales destacan el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{NO}_3$ ) y gases fluorados. Estas emisiones son producidas directamente por los humanos y otras son generadas por la combinación con fuentes naturales (Comisión Europea, 2020).

A nivel global, la industria alimentaria es un contribuyente de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, siendo responsable del 26% de las emisiones globales (Poore & Nemecek, 2018), lo que resalta la urgencia de adoptar medidas sostenibles en la producción alimentaria, tendientes a disminuir las emisiones GEI, lo que es posible mediante procesos estandarizados de cuantificación de estas. En este estudio se busca medir el impacto ambiental del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha en Chile, enfocado específicamente en la Industria Azucarera Nacional S.A. (IANSA) y su materia prima principal, remolacha azucarera.

En particular, este estudio se enfoca en la división Agrícola Terrandes de IANSA, que gestiona un total de 2.351 hectáreas propias cultivadas con remolacha. Este enfoque permite profundizar en el análisis del impacto

ambiental específico de las operaciones agrícolas y de producción asociadas a esta área significativa de cultivo.

En este marco, la remolacha azucarera es la segunda materia prima más importante para la producción de azúcar blanco a nivel mundial después de la caña de azúcar (Comisión Europea, 2019). Chile no es ajeno a esta realidad, ya que en el contexto de producción agrícola y su impacto ambiental IANSA representa un actor clave en la industria azucarera, comercializando más de 360 mil toneladas de azúcar al año y el manejo de 6.300 hectáreas para el cultivo de remolacha con planes de aumentar el área de cultivo a 8.000 hectáreas para el próximo año, esto no solo destaca la importancia económica y laboral sino que también plantea diversos desafíos en términos de sostenibilidad y gestión ambiental que son muy importantes de conocer y resolver (IANSA, 2023).

Este estudio se centrará en el proceso productivo del azúcar blanco de remolacha en formato de 1 kilogramo (kg) elaborado en planta azucarera Ñuble, temporada del 2023, teniendo como propósito llevar a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a la norma 14.044 de la organización internacional de la normalización (ISO) que permitirá cuantificar las emisiones de GEI asociadas con la producción de azúcar de remolacha desde la "cuna" (siembra de remolacha) hasta la "distribución al cliente" (puesto en la comuna de Santiago de Chile), incluyendo las etapas de producción de remolacha, producción de azúcar blanco de remolacha y transporte.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general:**

Desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida del azúcar blanco, a través de la medición de su huella de carbono, como una forma de generar estrategias para reducir su impacto ambiental.

### **2.2. Objetivos específicos:**

- Identificar los principales componentes y sus aportes a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero de las etapas de producción de remolacha, producción de azúcar blanco de remolacha y transporte del producto final.
- Cuantificar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en base a la ISO 14.044 del proceso productivo, de la planta azucarera IANSA Ñuble.
- Estimar huella de carbono del proceso productivo, comparar con producciones de otros países e identificar brechas.

### **3. ANTECEDENTES GENERALES**

#### **3.1. Análisis de Ciclo de Vida**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un método de evaluación utilizado para determinar el impacto ambiental asociado con todas las etapas de la vida de un producto, proceso o actividad. Este enfoque considera cada fase desde la extracción de materias primas hasta su disposición final o reciclaje. Se basa en la recopilación y análisis de datos de las entradas y salidas del sistema de modo que puedan obtener resultados que muestren su impacto potencial en el medio ambiente para que así se puedan identificar estrategias para reducir este impacto (de Gestión Ambiental, 2009).

##### **3.1.1. Análisis de Ciclo de Vida basado en norma ISO 14.044:2006**

El Análisis de Ciclo de Vida basado en la norma ISO 14.044, es un método para evaluar los efectos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto. Cubre aspectos como: establecer el objetivo del estudio, análisis de inventario, evaluar impactos ambientales y, finalmente, interpretar resultados para informar decisiones. Se destaca la importancia de la claridad y consistencia en el proceso para garantizar que los estudios de ACV sean comparables con otros, conforme a la ISO 14.044:2006. Al ser pautas estandarizadas, se facilita la realización de estudios ambientales de buena calidad, permitiendo que las partes interesadas puedan tomar decisiones bien informadas basadas en la evaluación de los impactos ambientales. Esto

fomenta la aplicación de prácticas más sostenibles y responsables con el medio ambiente, contribuyendo al desarrollo de metodologías eficaces y confiables.

La Comisión Europea ha proporcionado datos clave sobre la producción de azúcar de remolacha, subrayando su relevancia en la economía agrícola y la necesidad de considerar los impactos ambientales asociados a su producción (Comisión Europea, 2019). Este enfoque resalta la importancia de aplicar metodologías como el ACV en la industria azucarera para comprender y mitigar su impacto ambiental. Al alinear este estudio con las normas de ISO 14.044:2006, se busca no solo evaluar los impactos ambientales de la producción de azúcar de remolacha en Chile, sino también contribuir al desarrollo de prácticas sostenibles.

### **3.2. El potencial de calentamiento global (GWP)**

El potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) es una medida esencial para comprender el impacto de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidos en los distintos procesos productivos, incluido el proceso productivo de producción de azúcar blanco de remolacha. Esta medida, compara el efecto que tiene cada gas en el calentamiento de la atmósfera, respecto al CO<sub>2</sub>, considerando un periodo estándar, que comúnmente es de 100 años (EPA, 2023). El GWP permite evaluar y comparar la contribución de los distintos GEI a partir de sus características específicas,

como su capacidad del calentamiento de la atmosfera y su tiempo de permanencia.

En el ámbito del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha, el análisis del GWP es crucial por varias razones, entre ellas:

Uso de combustibles fósiles: Este proceso productivo, genera emisiones derivadas del uso de maquinaria y del transporte. Conocer el GWP generado por estas actividades, ayuda a identificar dónde se generan los mayores aportes y cómo reducir el uso de combustibles que más contribuyen al calentamiento global.

Fertilizantes sintéticos: La aplicación de estos productos, en la etapa de producción de la remolacha, libera  $N_2O$ , un gas con un GWP más alto que el  $CO_2$ . Conocer su impacto permite, generar conciencia de la necesidad de reducir su uso y buscar alternativas más sostenibles.

Procesamiento Industrial: Durante la transformación de remolacha en azúcar blanco, se generan  $CO_2$  y  $CH_4$ . En particular en los procesos de separación de sólidos, alcalización, clarificación, decoloración, filtración, evaporación, cristalización, centrifugado y secado, por lo que medir su GWP ayuda a determinar que procesos deben ser mejorados para hacerlos menos contaminantes.

La integración del GWP en el estudio ambiental del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha, no solo subraya los puntos críticos en términos

de emisiones de GEI, sino también orienta hacia estrategias efectivas para su mitigación. Al priorizar intervenciones en áreas con mayor impacto, se contribuye de manera significativa a la sostenibilidad de la industria azucarera y al esfuerzo contra el cambio climático.

En el contexto del ACV y su aplicación según la norma ISO 14.044:2006, el estudio realizado por Klenk *et al.* (2012), sobre el proceso productivo de azúcar blanco de remolacha en la Unión Europea, se convierte en un referente esencial. Este análisis revela que, el 32% de las emisiones de GEI se originan en el cultivo de la remolacha, un 4% en su transporte, y un significativo 64% en el procesamiento dentro de la planta de azúcar, con una notable incidencia de la producción de vapor en este último proceso. Además, se resalta cómo la huella de carbono del proceso productivo del azúcar blanco de remolacha muestra una notable variación, oscilando entre 242 y 946,5 kg de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq) por tonelada de azúcar blanco, dependiendo del método empleado en el análisis.

Además, el estudio de García González y Björnsson (2022) sobre la evaluación del ciclo de vida del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha y sus derivados complementa el análisis anterior al destacar las emisiones totales de GEI, las cuales se estimaron en 623 kg de CO<sub>2</sub>-eq por tonelada de azúcar blanco. Este estudio detalla cómo el cultivo y la producción de azúcar contribuyen de manera diferenciada a estas emisiones, con un 44% proveniente del cultivo y un 56% de la producción, enfatizando la significativa

influencia del uso de combustibles fósiles y las emisiones biogénicas. Este enfoque profundiza en la comprensión de los impactos ambientales específicos del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha.

Frehner (2021) llevó a cabo un análisis comparativo del ciclo de vida entre la remolacha azucarera de Chile y la caña de azúcar de México y Guatemala, enfocándose en diversas categorías de impacto ambiental. Específicamente, en la categoría de cambio climático, se encontró que el proceso productivo de azúcar blanco de remolacha tiene una huella de carbono de 1,33 kg de CO<sub>2</sub>-eq por kilogramo de azúcar, considerando las etapas de cultivo, producción y transporte. Este impacto, medido en Chile, es significativamente mayor al generado por la producción de azúcar de caña de Guatemala y México, con emisiones de 0,73 kg y 0,71 kg de CO<sub>2</sub>-eq respectivamente, siendo, el procesamiento de la remolacha, el mayor contribuyente a esta huella debido al uso intensivo de carbón, en la generación de vapor, por parte de la industria azucarera chilena.

Šarauskis *et al.* (2018) realizaron una evaluación exhaustiva de los sistemas de cultivo convencionales y orgánicos de la remolacha azucarera, enfocándose en indicadores clave como el uso de energía y las emisiones de carbono. Este análisis revela variaciones notables en términos de eficiencia energética y huella de carbono entre ambos enfoques agrícolas, subrayando la importancia crítica de implementar prácticas de cultivo sostenibles para

atenuar el impacto ambiental asociado a la producción de remolacha azucarera.

El estudio de Tzilivakis *et al.* (2005) resalta cómo los métodos de cultivo afectan significativamente el uso de energía y las emisiones de GEI en la producción de remolacha azucarera en el Reino Unido. Demuestra que prácticas orgánicas o el cultivo en suelos con mayor cantidad de nutrientes pueden reducir el consumo energético y las emisiones, aunque el ahorro puede compensarse con el transporte a larga distancia. Este enfoque subraya la importancia de considerar el ciclo completo de producción para implementar estrategias sostenibles eficazmente.

Los estudios sobre el proceso productivo de azúcar blanco de remolacha destacan que el mayor impacto en la huella de carbono proviene del procesamiento, seguido por el cultivo y, en menor medida, el transporte. Estos hallazgos, por una parte, sirven de guía para determinar las etapas en las que se deben obtener datos de calidad y, por otra parte, enfatizan la importancia de evaluar y mejorar las etapas del proceso productivo para reducir el impacto ambiental, sugiriendo un enfoque hacia procesos más eficientes, prácticas agrícolas sostenibles, y logística optimizada. La adopción de estas estrategias es crucial para avanzar hacia una industria azucarera más sostenible.

#### **4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

La metodología de investigación se basa en la norma ISO 14.044:2006 para el Análisis de Ciclo de Vida, orientada a evaluar el impacto ambiental del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha en relación con el cambio climático. Este enfoque se divide en cuatro etapas clave: definición de objetivos y alcance, recolección de datos de inventario, cálculo de emisiones para evaluación de impacto e interpretación de resultados.

En la primera etapa, se establece el enfoque del estudio y se delimitan los límites del proceso, identificando también la unidad funcional coherente con el estudio. La segunda etapa implica la recopilación de datos sobre las entradas y salidas del proceso productivo, para posteriormente ser ingresados en el software openLCA. En la tercera etapa, se realiza el cálculo de emisiones, convirtiendo los datos recopilados en dióxido de carbono equivalente, lo que permite una comparación uniforme de las emisiones de diferentes Gases de Efecto Invernadero, luego se analiza el impacto de estas emisiones de GEI en el cambio climático. Finalmente, en la cuarta etapa, se examinan los hallazgos para identificar áreas críticas y sugerir mejoras, lo que permite comprender y proponer formas de reducir el impacto ambiental del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha.

A continuación, se detalla cómo se implementó cada etapa del ACV conforme a esta norma, los métodos de recolección de datos, las herramientas empleadas y las adaptaciones específicas para este estudio.

#### **4.1. Unidad funcional**

La unidad funcional definida para este estudio es kg de CO<sub>2</sub>-eq (dióxido de carbono equivalente) por kilogramo de azúcar blanco producido. La cual es consistente con el objetivo de evaluar y comparar los impactos ambientales del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha, enfocándose en las emisiones de GEI. Facilitando así la identificación de prácticas de producción más sostenibles y permitiendo la sugerencia de mejoras en la reducción de la huella de carbono.

#### **4.2. Límite del sistema**

Este análisis del impacto ambiental en la industria azucarera chilena se centra específicamente en el proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha, desde la cuna hasta la distribución al cliente, para la temporada 2023 en la planta azucarera Ñuble, como se observa en la Figura 1, con un enfoque particular en la división Agrícola Terrandes de IANSA, que gestiona 2.351 hectáreas dedicadas al cultivo de remolacha.

La elección de limitar el estudio a Terrandes se debe a la disponibilidad y fiabilidad de los registros de producción e insumos, lo que permite un examen detallado del impacto ambiental.

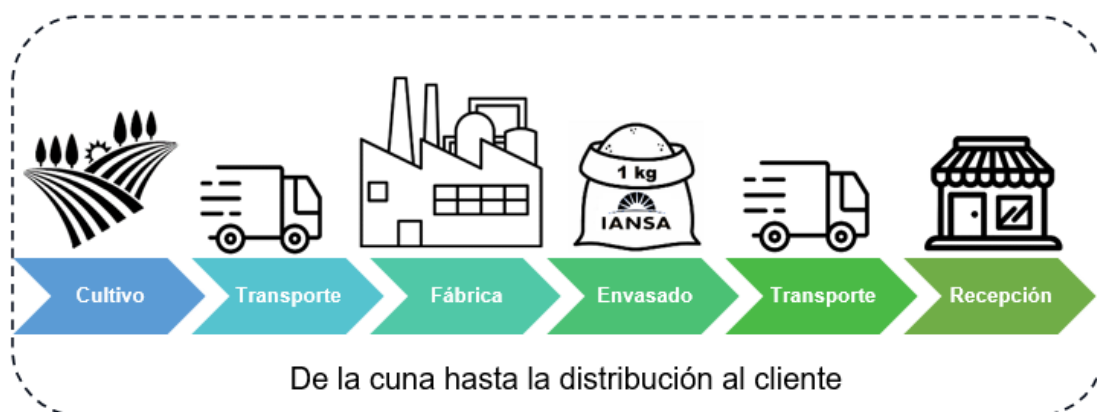


Figura 1. Análisis de Ciclo de Vida para el proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con distribución a Santiago Centro.

A continuación, se definen las etapas consideradas en este estudio:

**a. Producción de remolacha:** Esta etapa incluye un análisis detallado de las emisiones de GEI generadas desde la siembra hasta la cosecha de remolacha. Se abarcan todas las actividades agrícolas necesarias, como plantación, labranza, aradura, rastraje, aplicación de fertilizante y de pesticidas, cosecha de remolacha y riego, evaluando su impacto en términos de emisiones de GEI y proponiendo posibles medidas para la reducción de estas emisiones.

**b. Producción de azúcar blanco de remolacha:** Se estudia el proceso integral desde la recepción de la remolacha hasta la producción del azúcar blanco en formato de 1 kg. Se incluye un análisis de las emisiones de GEI del proceso, la salida de aguas residuales, y residuos de productos, identificando áreas clave para la optimización del proceso y reducción del impacto ambiental.

**c. Transporte:** Se considera el transporte de insumos agrícolas al campo, el transporte de la remolacha desde el campo hasta la planta y el transporte del azúcar blanco desde la planta hasta el centro de distribución en Santiago de Chile. Se evalúa la contribución de estas etapas de transporte a las emisiones totales de GEI, considerando aspectos como la carga, la distancia y el tipo de vehículo utilizado.

La metodología adoptada para este estudio permite la comprensión de las contribuciones de cada etapa del proceso productivo de azúcar blanco a las emisiones de GEI, destacando oportunidades para la implementación de prácticas más sostenibles y la reducción del impacto ambiental en la industria azucarera chilena.

### **4.3. Análisis de inventario**

El análisis de inventario, se centra en cuantificar la cantidad total de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas con todas las etapas de la vida de un producto o servicio, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. El objetivo principal es identificar y cuantificar las fuentes de emisiones de carbono para implementar estrategias de reducción más efectivas. En particular, este estudio se enfoca en las tres etapas del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha: producción de remolacha, producción de azúcar blanco de remolacha y transporte. En la Figura 2, se observan las etapas de producción y su interacción.

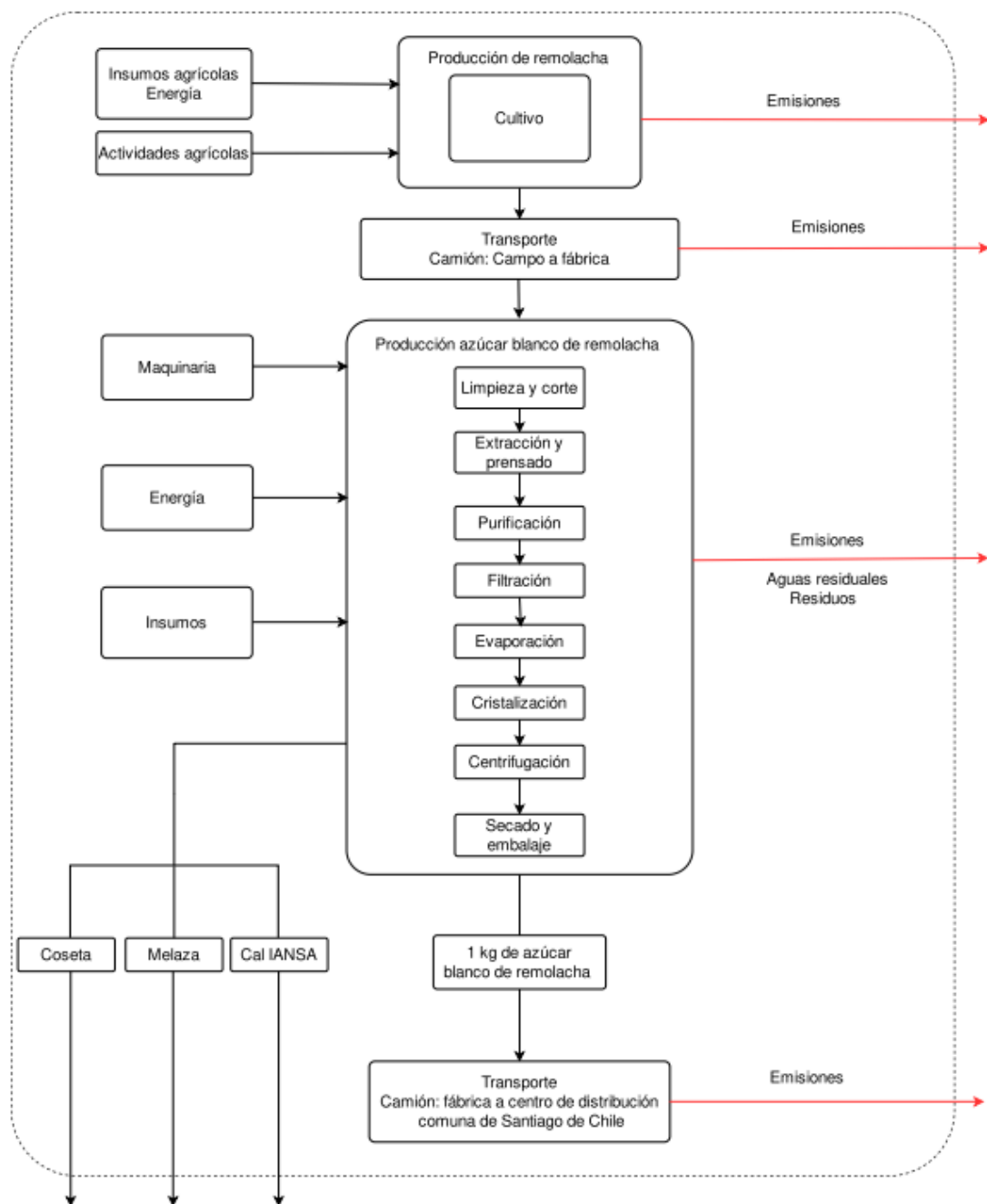


Figura 2. Diagrama del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha.

Los datos necesarios para este estudio se encuentran en Tabla 1 y fueron proporcionados por la empresa, abarcando tanto las operaciones de campo como las de la planta y el transporte.

Tabla 1. Resumen de datos de análisis de inventario para el proceso productivo de azúcar blanco de remolacha temporada 2023.

Cultivo de remolacha azucarera	Unidad	Cantidad
Semillas	kg ha <sup>-1</sup>	0,3
Nitrógeno	kg N ha <sup>-1</sup>	201,7
Fósforo	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	354,4
Potasio	kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup>	0,1
Zinc	kg ZnO ha <sup>-1</sup>	0,03
Boro	kg B ha <sup>-1</sup>	0,1
Azufre	kg S ha <sup>-1</sup>	104,3
Cal	kg CaO ha <sup>-1</sup>	85,7
Fungicidas	kg ha <sup>-1</sup>	2,7
Insecticidas	kg ha <sup>-1</sup>	1,5
Herbicidas	kg ha <sup>-1</sup>	15
Electricidad	kWh ha <sup>-1</sup>	1650
Diesel	L ha <sup>-1</sup>	87
<b>Procesamiento azúcar blanco (Entradas)</b>		
Ceniza de soda pesada	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	1,10E-02
Anhídrido sulfuroso a granel	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	1,41E-03
Químicos auxiliares	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,16E-03
Ácido sulfúrico de 98%	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	6,49E-04
Soda cáustica líquida	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,99E-04
Sal industrial	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,59E-04
Floculante bufloc - 565 pwg	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	1,31E-04
Cal viva	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	3,16E-02
Caliza cap	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,18E-01
Carbón coque	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	5,86E-01
Carbón	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	8,98E+00
Diesel	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,28E-02
GLP	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	5,32E-03
Petróleo	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	8,61E-02
Electricidad	kWh kg <sup>-1</sup> azúcar	1,66E-02

Procesamiento azúcar blanco (Salidas)		
Aguas residuales	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> azúcar	2,49E-02
Biorresiduos	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,30E-02
Papel y cartón	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	5,03E-05
Residuo sólido	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,02E-03
Total residuos no peligrosos	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	2,51E-02
Total de residuos peligrosos	kg kg <sup>-1</sup> azúcar	8,02E-05
Transporte		
Transporte de insumos	km	83
Transporte de remolacha a planta	km	83
Transporte de azúcar a Santiago Centro	km	356

Fuente: Elaboración propia.

La información referente fue extraída de la base de datos AGRIBALYSE 3.1.1. disponible en el software openLCA, versión 2.0.2, para cuantificar las emisiones de GEI de las etapas del proceso productivo de azúcar blanco, que incluyen, desde los insumos, la maquinaria, la infraestructura agrícola y de fábrica, hasta los datos relacionados con el transporte. Los datos utilizados en este estudio fueron ingresados al software según lo detallado en los anexos adjuntos.

#### 4.3.1. Producción de remolacha

El estudio se enfoca en la división Agrícola Terrandes de empresas IANSA, específicamente en la etapa de producción de remolacha, desde la siembra hasta el cultivo en las regiones de Maule, Ñuble y Biobío. Se seleccionó tres campos de cultivo representativos en estas regiones: "Tolpán" en Biobío, "El Porvenir" en Maule y "San Juan" en Ñuble, que juntos suman una diversidad de prácticas agrícolas y que en su conjunto superan las 146 hectáreas. Estos

campos fueron elegidos para analizar el uso medio de insumos (semillas, fertilizantes, fungicidas, insecticidas, y herbicidas), el rendimiento promedio por hectárea, y las actividades agrícolas realizadas. Por otra parte, otros dos tipos campos fueron seleccionados usando como criterio su fuente de energía. En particular, "Lolcura" y "Santa Magdalena" solo utilizan electricidad para el riego, mientras que "Tolpán" utiliza solo diésel. La superficie de cada uno de estos predios fue el factor de ponderación para el cálculo de la huella de carbono según su fuente. El resultado de este análisis refleja la huella de carbono total de las operaciones en las 2.351 hectáreas cultivadas por Terrandes durante la temporada 2022-2023.

Dentro del marco del análisis de inventario, para este estudio, se evaluó el impacto asociado al cambio de uso de la tierra, en relación con la producción de remolacha. Sin embargo, un análisis preliminar determinó que las emisiones de GEI atribuibles a este aspecto son mínimas por lo que no fueron incluidas en el estudio. La justificación se basa en que los campos destinados al cultivo de remolacha, dentro del contexto de este estudio, ya forman parte de las tierras agrícolas existentes. Por lo tanto, no se requiere la conversión de terrenos no agrícolas para su uso en agricultura, mitigando así potenciales emisiones adicionales de GEI que tal conversión podría generar.

Para determinar el consumo de energía asociado con el riego en la temporada, se realizó un análisis de los sistemas de riego empleados en los cultivos de Terrandes, diferenciando entre aquellos operados eléctricamente y los que

funcionan con diésel. La evaluación tomó como base los costos totales de riego por hectárea de cada campo, se ajustaron estos cálculos según los precios de la electricidad y diésel vigentes en enero de 2023, y en relación con estos costos, se estimó la cantidad de energía consumida por hectárea. Se identificó que el 11% del área total, equivalente a 247,9 hectáreas, utiliza riego a diésel, mientras que el sistema de riego eléctrico se aplica en el resto de las 2.351 hectáreas. Se distribuyó el consumo de energía, por hectárea, en base a su porcentaje de la superficie total, como se observa en Tabla 2, para calcular su correspondiente impacto en la huella de carbono de la producción de remolacha.

Tabla 2. Consumo energético estimado por hectárea de riego en Agrícola Terrandes temporada 2022-2023.

Bombeo por	Área total (%)	Consumo promedio	Consumo estimado	Unidades
Electricidad	89%	1844	1650	kWh ha <sup>-1</sup>
Diesel	11%	825	87	L ha <sup>-1</sup>

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los fertilizantes, ante la ausencia de datos específicos para cada tipo de fertilizante, se procedió a una subdivisión según la composición química de cada uno. Esta estrategia permitió desglosar y cuantificar de manera más precisa el uso de nutrientes esenciales para el cultivo. Posteriormente, se sumó los totales de cada componente para obtener una visión integral del aporte de fertilizantes a la producción de remolacha. En el caso de las actividades agrícolas, se consideró: plantación, labranza, aradura, rastraje, aplicación de fertilizante, de pesticidas y cosecha de remolacha. Para

cada actividad el software openLCA calculó el consumo de recursos, emisiones, y otros impactos ambientales asociados, como, por ejemplo, el impacto de los empaques de fertilizantes y pesticidas (Anexo 8.1.).

#### **4.3.2. Producción de azúcar blanco de remolacha**

La etapa de producción de azúcar blanco de remolacha, abarca desde la recepción de la remolacha en las instalaciones, hasta el punto en que el azúcar se envasa en bolsas de polietileno de baja densidad (PEBD) de 1 kg, listas para su distribución. Se recopiló una serie de datos directamente de la planta para analizar el proceso, entre los cuales se incluyen el consumo de electricidad y combustibles, así como el uso de varios insumos.

Entre los insumos se contabilizó la ceniza de soda pesada, anhídrido sulfuroso a granel, ácido sulfúrico al 98%, soda cáustica líquida, sal industrial, floculante bufloc - 565 pwg, cal viva y caliza cap. Para aquellos insumos no encontrados en la base de datos, se les identificó como químicos auxiliares debido a su composición, tales como el antiespumante, el inhibidor Kebo-DS, el inhibidor de corrosión Triac 1820.61 y la formalina industrial. Se midió las cantidades de azúcar blanco y co-productos resultantes, junto con el volumen de aguas residuales producidas. Además, se clasificó los residuos generados en categorías como: biorresiduos y residuos de productos destinados a compost, papel y cartón para reciclaje, residuo sólido para vertedero, y se contabilizó el total de residuos peligrosos y no peligrosos destinados a la incineración (Anexo 8.2.).

### **4.3.3. Transporte**

En el análisis de transporte, se consideró el traslado de insumos agrícolas, incluyendo semillas, fertilizantes, fungicidas, insecticidas y herbicidas hacia los campos. La planta de producción de azúcar fue establecida como el centro de distribución de estos insumos. Se determinó una distancia de transporte promedio de 83 kilómetros (km), tanto para los insumos desde la planta hasta los campos, como de la remolacha desde los campos hasta la planta. Adicionalmente, se tomó en cuenta el transporte del producto finalizado, hasta la comuna de Santiago Centro, con una distancia aproximada de 356 km. Todas las medidas fueron realizadas a través de Google Maps® (Anexo 8.3.).

### **4.4. Evaluación de impacto**

La evaluación de los efectos de GEI sobre el cambio climático, en este estudio, se realizó empleando el enfoque del potencial de calentamiento global a 100 años (GWP 100a) definido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en 2013. Este enfoque fue escogido debido a su reconocimiento y validación a nivel internacional, así como su habilidad para facilitar una medida comparativa del impacto que tienen diversas emisiones de GEI respecto al CO<sub>2</sub>. Dicha metodología es crucial para informar y guiar la formulación de políticas y acciones dirigidas a la mitigación del cambio climático globalmente (IPCC, 2014).

#### **4.5. Asignación**

Para el Análisis de Ciclo de Vida del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha, se implementó una metodología de Asignación Económica, conforme a las directrices establecidas por la norma ISO 14.044, para distribuir los impactos ambientales entre el producto principal y los co-productos. Esta metodología se emplea cuando no se dispone de información de las emisiones de GEI de cada operación unitaria del proceso. De este modo, se le asigna emisiones GEI, a cada producto o co-producto generado, de forma proporcional al valor económico de cada uno de ellos.

La justificación para la adopción de esta Asignación Económica radica en la existencia de co-productos con valor de mercado significativo, como en el caso de la melaza, los cuales aportan sustancialmente a las utilidades en la etapa de producción. La incorporación de estos co-productos, a través de la Asignación Económica, permite una repartición de los impactos ambientales más equitativa y refleja con mayor precisión la contribución económica de cada producto al sistema en su conjunto.

Para llevar a cabo la Asignación Económica, inicialmente se determinó las cantidades de todos los co-productos resultantes por cada kilogramo de azúcar blanco producido, tal como se observa en el Anexo 8.2. Posteriormente, se obtuvo el valor de mercado actual de cada co-producto, directamente de empresas IANSA, lo que permitió establecer con exactitud los precios de los datos económicos empleados en el análisis. A partir de esta

información, se calculó el valor económico total generado por la producción, y se estableció la proporción de valor que cada co-producto, incluido el azúcar blanco, representa dentro del total.

Basándose en estas proporciones económicas, se procedió a la asignación de los impactos ambientales del proceso productivo de manera proporcional a su aporte al valor económico global. La distribución final asignó el 86% de los impactos al azúcar blanco por cada kilogramo producido, el 12% a la melaza, el 1% a la cal, y el 1% a la coqueta seca. Dicha asignación evidencia la contribución proporcional de cada producto al valor económico total, facilitando así una evaluación de su impacto ambiental individual.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1. Resultados**

Se realizó un desglose por etapa del proceso productivo del azúcar blanco de remolacha de 1 kg, para las que a continuación, se detalla sus respectivas emisiones de Gases de Efecto Invernadero, desde la producción de la remolacha, hasta la distribución del azúcar blanco procesado, culminando con el cálculo del impacto total.

#### **5.1.1. Producción de remolacha**

En el análisis de esta etapa, las emisiones GEI alcanzaron 0,309 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco, valor obtenido de la Figura 12 en el Anexo 8.5. Específicamente, los fertilizantes nitrogenados emergen como los principales contribuyentes, generando 0,116 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco y representando el 37,3% de las emisiones de GEI de esta fase productiva. Por otro lado, la electricidad utilizada para el riego aporta el 18,7% y el diésel utilizado en las actividades de riego contribuye con un 12,1% a la huella de carbono global del cultivo, los resultados obtenidos se observan en la Figura 3 y 4.

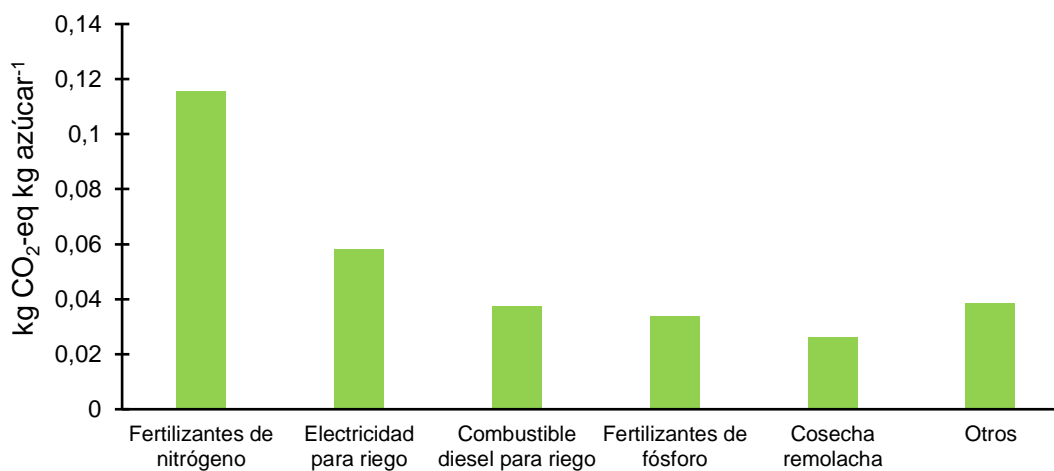


Figura 3. Contribución de las distintas prácticas agrícolas a la huella de carbono de producción de remolacha (elaboración propia).

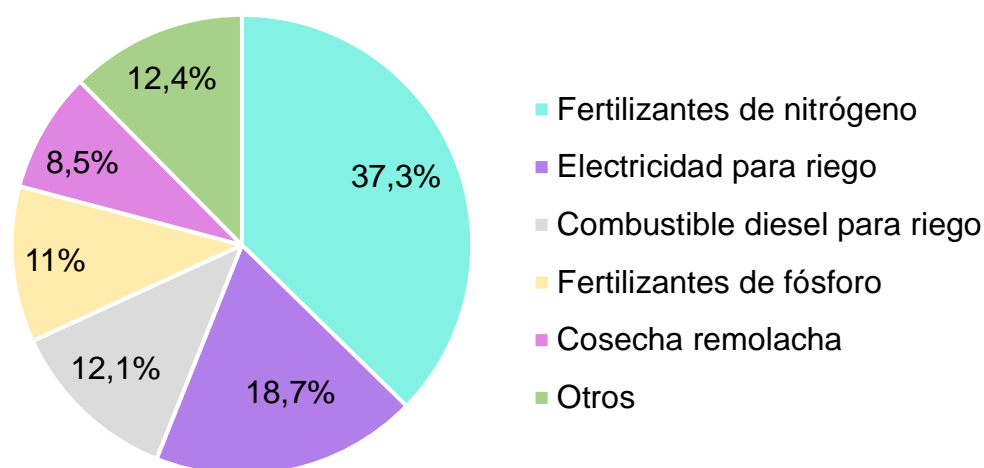


Figura 4. Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la etapa de producción de remolacha (elaboración propia).

### 5.1.2. Producción de azúcar blanco de remolacha

Durante la etapa de producción de azúcar blanco, se identificó una huella de carbono de 1,177 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco, valor obtenido a partir del método de Asignación Económica, calculado mediante el software

openLCA y cuyos resultados se muestran en la captura de pantalla de la Figura 14 en el Anexo 8.5. Esta etapa del proceso, incluye todas las operaciones desde la recepción de la remolacha hasta la obtención del azúcar de 1 kg envasado, se caracteriza por un consumo energético intensivo, en el cual el carbón se destaca como el recurso energético principal. El carbón representa 1,062 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco producido, lo que equivale a un 90,3% del total de las emisiones de GEI para esta etapa del proceso. Subrayando su predominancia en la contribución a las emisiones del producto final, los resultados obtenidos se observan en la Figura 5 y 6.

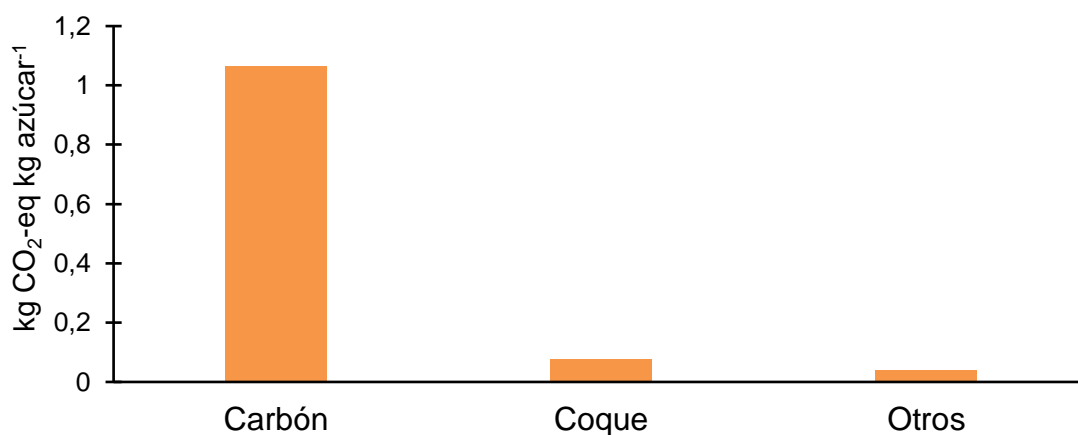


Figura 5. Contribución de la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha a la huella de carbono (elaboración propia).

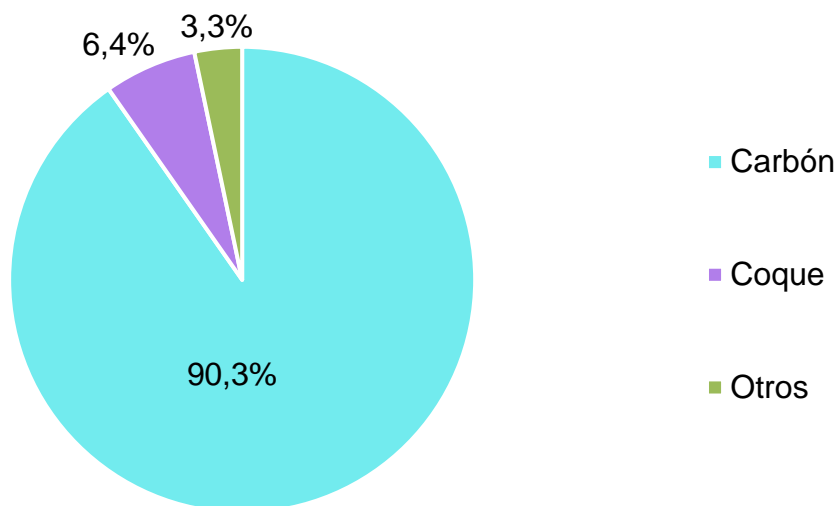


Figura 6. Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha (elaboración propia).

### 5.1.3. Transporte

Durante la etapa de transporte, se ha evaluado el impacto derivado del transporte de insumos hacia las áreas de cultivo de remolacha, el traslado de la remolacha hacia la planta de procesamiento y finalmente, el transporte del producto hasta Santiago Centro, las emisiones están basadas en un camión diésel con capacidad para 30 toneladas, dando un total de 0,130 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco, valor obtenido desde el software openLCA y cuya captura de pantalla se muestra en la Figura 16 en el Anexo 8.5. Se identificó, que la etapa con mayor impacto, en términos de emisiones de GEI, es el transporte de la remolacha a la fábrica, representando 0,080 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco producido. Este factor contribuye con un 61% a la huella de carbono total asociada con el transporte, lo cual se destaca especialmente al

considerar que se requieren 6,76 kilogramos de remolacha para producir un kilogramo de azúcar blanco (Anexo 8.2.).

En el caso del transporte de insumos, el valor es irrelevante, los resultados obtenidos se observan en la Figura 7 y 8.



Figura 7. Contribución de la etapa de transporte a la huella de carbono (elaboración propia).

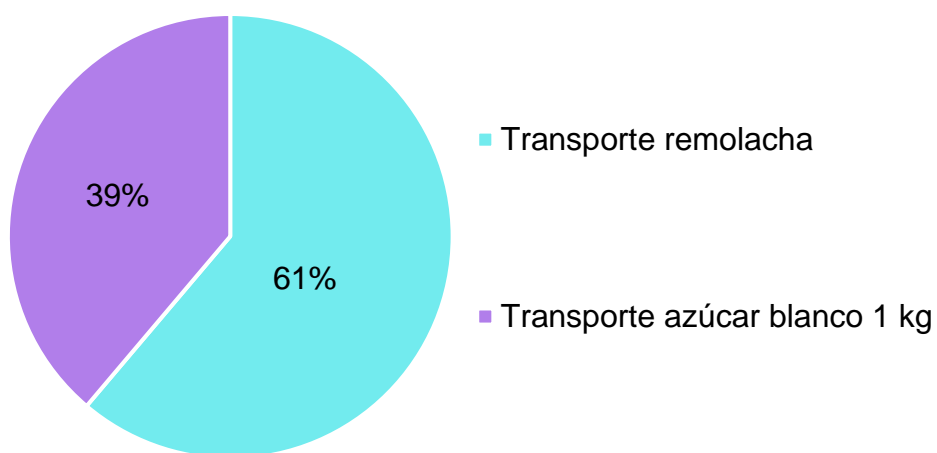


Figura 8. Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la etapa transporte (elaboración propia).

#### **5.1.4. Evaluación total de la huella de carbono**

En la evaluación del ciclo de vida del proceso productivo de azúcar blanco de remolacha, para la temporada 2023, que abarca las tres etapas del proceso, se determinó una huella de carbono total de 1,617 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco producido, como se muestra en la captura de pantalla del software openLCA en la Figura 18 en el Anexo 8.5.

El estudio reveló que la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha es el principal contribuyente a la huella total, representando el 73% de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero, donde el carbón es la mayor fuente de emisión. Esta predominancia del carbón demuestra su impacto significativo en la huella ambiental del proceso productivo.

La etapa de producción de remolacha constituye el segundo mayor aporte a las emisiones de GEI, con un 19% de la huella de carbono total. En particular, dentro de las actividades agrícolas, la de aplicación de fertilizantes nitrogenados, es la que genera el mayor aporte en esta etapa. Este dato evidencia la relevancia del manejo de insumos agrícolas en la contribución global a la huella de carbono.

Finalmente, el transporte, especialmente el traslado de la remolacha a la planta de procesamiento contribuye con el 8% de las emisiones totales, los resultados se presentan en la Figura 9 y 10.

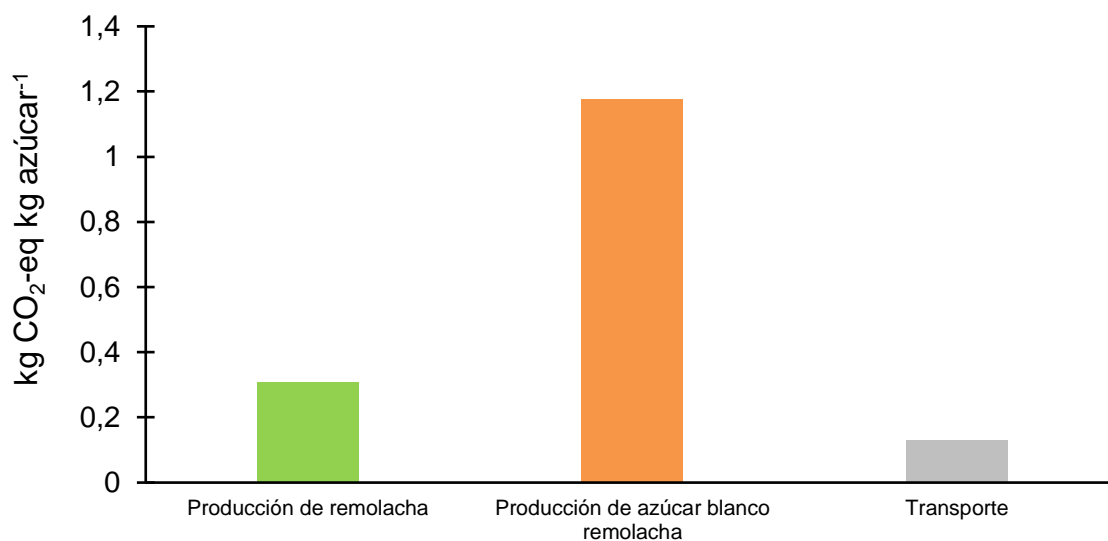


Figura 9. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Análisis de Ciclo de Vida de 1 kg azúcar blanco de remolacha 2023 (elaboración propia).

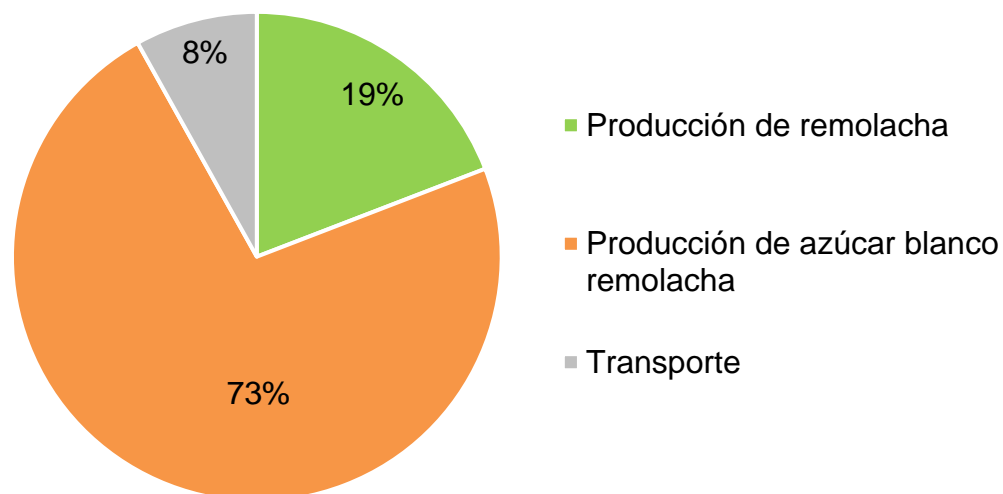


Figura 10. Distribución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Análisis de Ciclo de Vida de 1 kg azúcar blanco de remolacha temporada 2023 (elaboración propia).

Finalmente, debido a que se empleó una metodología estándar (ISO 14.044) esta evaluación de la huella de carbono asociada con el proceso productivo de azúcar blanco de remolacha, puede ser comparada con otras investigaciones, como la de Frehner (2021). Esta investigación, examinó la producción en empresas IANSA en Chile, reportando una huella de carbono de 1,33 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco, abarcando las etapas de producción de remolacha, producción de azúcar blanco de remolacha y transporte. En contraste, el presente estudio muestra una huella de carbono ligeramente mayor, de 1,61 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco. Esta diferencia se atribuye principalmente a la metodología de Asignación Económica empleada en ambos estudios, lo cual introduce variabilidad en los resultados, debido a la fluctuación de los precios del azúcar blanco y los co-productos en el mercado.

Al comparar este estudio con el de Klenk *et al.* (2012) en la Unión Europea, que encontró una huella de carbono de 0,947 kg de CO<sub>2</sub>-eq por kg de azúcar blanco, notamos similitudes especialmente en las emisiones de la producción de remolacha. Las variaciones en las emisiones totales pueden atribuirse a diferencias en la gestión agrícola, así como en el consumo de electricidad y diésel. En la fase de producción de azúcar blanco de remolacha, las emisiones identificadas por Klenk *et al.* (2012) son menores, posiblemente por la eficiencia en el uso de insumos y energía. La comparación del transporte es menos directa debido a las diferencias en las distancias de traslado.

### **5.2.1. Puntos críticos**

Se ha identificado tres puntos críticos, esto es:

- Fertilizantes. El uso de fertilizantes nitrogenados en la etapa de producción de remolacha representa el 37,3% de las emisiones de GEI, lo que indica un área crítica donde la optimización en el uso de fertilizantes o la adopción de alternativas más sostenibles podría reducir significativamente la huella de carbono.
- Carbón. El carbón emerge como el recurso energético más significativo en la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha, contribuyendo con el 90,3% de las emisiones de GEI en esta etapa. La dependencia del carbón resalta un punto crítico donde la transición hacia fuentes de energía renovables o más limpias podría tener un impacto importante en la reducción de emisiones.
- Transporte. El transporte de la remolacha contribuye con el 61% a la huella de carbono total asociada con el transporte, destacando la importancia de considerar la eficiencia logística y posibles mejoras en el transporte para disminuir las emisiones.

### **5.2.2. Calidad e incertidumbre de los datos**

Durante el período de estudio de 2023, se recolectó datos primarios, obtenidos directamente de la empresa, que, si bien proporcionan una base sólida para el análisis, presentan ciertas limitaciones en términos de precisión y

representatividad. Las cantidades de combustible diésel y electricidad utilizadas en la etapa de producción de remolacha fueron estimadas mediante la proporción de consumo por hectárea. Este método de estimación puede no reflejar con exactitud las condiciones específicas de las operaciones de riego.

Además, el uso de la base de datos AGRIBALYSE para evaluar las emisiones asociadas a las actividades agrícolas, si bien es valioso por su especificidad en cuanto a los diferentes procesos y las emisiones resultantes, conlleva la limitación, producto de que los datos son un reflejo de la realidad mundial y no específicamente de la realidad de Chile. Esto puede resultar en una menor representatividad de las condiciones locales y específicas de Chile, afectando la precisión del análisis de impacto ambiental.

Al recurrir a una Asignación Económica, para distribuir los impactos entre el producto principal y los diferentes co-productos, esta puede no reflejar adecuadamente la realidad operativa y ambiental de la empresa, introduciendo otra capa de incertidumbre en el análisis.

### **5.2.3. Transformación energética sostenible en la industria azucarera:**

#### **Reducción de la huella de carbono mediante la transición de carbón a biomasa**

Como parte de una estrategia para reducir su impacto ambiental, la planta azucarera Ñuble, reemplazará, su actual caldera de carbón, por una nueva que operará con biomasa, específicamente con astillas de madera. Este

cambio se anticipa que tendrá un efecto significativo en la disminución de la huella de carbono asociada al proceso productivo. A través de un análisis, basado en el poder calorífico del carbón y la cantidad consumida, se ha calculado la cantidad necesaria de biomasa (Anexo 8.4.) para mantener la eficiencia del proceso. A partir de este cálculo, se estimó que las emisiones, al emplear biomasa, se podrían reducir en un 48%, disminuyendo las emisiones a 0,845 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco producido.

Estos valores pueden ser observados en la captura de pantalla de la Figura 21 en el Anexo 8.5. Adicionalmente, se ha contemplado la posibilidad de sustituir el carbón, utilizado en el secador de coqueta, por biomasa. De implementarse esta medida, junto con el cambio de caldera, se proyecta una reducción adicional en la huella de carbono, que alcanza el 62% y registrando una huella final de 0,620 kg de CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> de azúcar blanco, valor obtenido de la Figura 24 en el Anexo 8.5. Este análisis, subraya el considerable potencial de mejora en la sostenibilidad del proceso productivo, a través de la integración de la biomasa como fuente de energía.

#### **5.2.4. Recomendaciones**

En el contexto de este estudio, y basándose en las investigaciones previas, se han identificado diversas estrategias para mitigar las emisiones de GEI asociadas al cultivo de remolacha azucarera. Estas estrategias están fundamentadas en las conclusiones de los estudios realizados por Tzilivakis *et al.* (2005) y Šarauskis *et al.* (2018), los cuales resaltan la crítica necesidad de

adoptar prácticas agrícolas más sostenibles que contribuyan a una producción con menores emisiones de GEI:

- Preferir el uso de fertilizantes orgánicos, como el estiércol, frente a los sintéticos, ya que mejoran la estructura del suelo, la retención de agua, y la biodiversidad microbiana, lo que puede aumentar la sostenibilidad a largo plazo del sistema agrícola, que se alinea con los propuesto por Tzilivakis *et al.* (2005).
- Finalmente, se aconseja la incorporación de cultivos de cobertura y la aplicación de una rotación de cultivos efectiva para mejorar la salud del suelo y reducir la dependencia de químicos (Šarauskis *et al.*, 2018).

Estas medidas, conjuntamente, ofrecen un camino hacia una producción de remolacha azucarera más respetuosa con el medio ambiente, alineada con los objetivos de mitigación del cambio climático.

Por otra parte, adaptando el análisis y las conclusiones de García González y Björnsson (2022) junto con los resultados obtenidos en este estudio, se enfatiza la necesidad de adoptar métodos amigables con el medio ambiente en la producción de azúcar blanco de remolacha.

En ese sentido, una estrategia clave es la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovable, como biomasa, para la generación de calor en el proceso productivo de azúcar blanco. Tal cambio podría llevar a una notable disminución en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero,

marcando un avance significativo hacia la minimización del impacto ambiental vinculado con la producción de azúcar blanco.

Además, en cuanto a la optimización del transporte, se propone implementar la incorporación de vehículos eléctricos o híbridos en la flota de transporte para la producción de azúcar blanco de remolacha siendo una estrategia sostenible que busca minimizar el impacto.

Paralelamente, es crucial impulsar la educación sobre prácticas sostenibles en todas las fases de producción de remolacha y azúcar blanco de remolacha, mediante programas de capacitación, talleres y distribución de material educativo que aborde la gestión de recursos, la eficiencia energética y la disminución de emisiones.

Finalmente, se sugiere además el establecimiento de sistemas de incentivos para fomentar la adopción de estas prácticas sostenibles entre todos los actores involucrados.

## 6. CONCLUSIONES

- El ACV permitió identificar estrategias para reducir su impacto ambiental. Entre las que destacan, el cambio de carbón a biomasa y la implementación de prácticas agrícolas más sostenibles.
- Fue posible identificar los principales aportantes de GEI, destacando:
  - En la etapa de producción de remolacha, los fertilizantes nitrogenados representan el 37,3% de las emisiones.
  - En la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha, el carbón es responsable del 90,3% de las emisiones.
  - En la etapa de transporte, el traslado de la remolacha a la fábrica representa el 61% de la huella de carbono.
- Fue posible cuantificar las emisiones de GEI, en base a la ISO 14.044 del proceso productivo, las que alcanzan 1,617 kg de CO<sub>2</sub>-eq por kg de azúcar blanco. De este total, la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha genera un 73% de las emisiones totales, seguida por la etapa de producción de remolacha, que representa un 19% del total y finalmente, la etapa de transporte, que aporta un 8% a las emisiones.
- La huella de carbono total del proceso productivo supera en un 21,6% los resultados de Frehner (2021) en Chile y muestra variaciones de un 70,7% con respecto a los hallazgos de Klenk *et al.* (2012) en la Unión Europea, que se explican por diferencias en prácticas culturales y fuentes de energía.

## 7. LITERATURA CITADA

- Comisión Europea. (2019, 05-07-2019). Azúcar. Recuperado 01-02-2024 de [https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/sugar\\_en](https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/sugar_en)
- Comisión Europea. (2020). Causas del cambio climático. Recuperado 01-02-2024 de [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_es](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_es)
- de Gestión Ambiental, S. P. (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Ihobe. In: Bilbao. Recuperado de <http://www.comunidadism.es/wpcontent/uploads> ....
- EPA. (2023, 18-04-2023). Understanding Global Warming Potentials. Recuperado 27-02-2024 de <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- Frehner, A. (2021). Comparative life cycle assessment on beet sugar and cane sugar Zurich University of Applied Sciences]. Wädenswil, Switzerland.
- Gonzalez, M. N. G., & Björnsson, L. (2022). Life cycle assessment of the production of beet sugar and its by-products. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131211.
- IANSA. (2023). Gestión y tecnología. [https://empresasiansa.cl/produccion-agricola/wp-content/uploads/sites/7/2023/08/Revista-42-lansa\\_ALTA\\_compressed-comprimido\\_compressed\\_compressed.pdf](https://empresasiansa.cl/produccion-agricola/wp-content/uploads/sites/7/2023/08/Revista-42-lansa_ALTA_compressed-comprimido_compressed_compressed.pdf)
- IPCC. (2014). Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1454, 147.
- ISO. (2006). Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices.
- Klenk, I., Landquist, B., & de Imana, O. R. (2012). The product carbon footprint of EU beet sugar. *Sugar Ind*, 137, 169-177.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992. <https://doi.org/doi:10.1126/science.aaq0216>
- Šarauskis, E., Romaneckas, K., Kumhála, F., & Kriauciūnienė, Z. (2018). Energy use and carbon emission of conventional and organic sugar beet farming. *Journal of Cleaner Production*, 201, 428-438.

Tzilivakis, J., Warner, D. J., May, M., Lewis, K. A., & Jaggard, K. (2005). An assessment of the energy inputs and greenhouse gas emissions in sugar beet (*Beta vulgaris*) production in the UK. *Agricultural Systems*, 85(2), 101-119.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agry.2004.07.015>

## 8. ANEXOS Y APÉNDICES

### 8.1. Producción de remolacha

En la Tabla A1, se muestran las cantidades necesarias en cada operación para cuantificar las emisiones de GEI utilizando el software openLCA para la producción de 1 kg de remolacha azucarera. Para esto todas las operaciones se dividen por el rendimiento, en ellas se consideran los insumos y su envasado, la energía y las actividades agrícolas. El rendimiento se obtiene de los datos entregados de tres campos de Agrícola Terrandes, con un promedio de 100,48 toneladas de remolacha cosechada por hectárea durante la temporada 2023. En los insumos se consideran los kilogramos por hectárea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de semillas, fertilizantes y pesticidas. Los fertilizantes fueron desglosados según sus componentes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Zinc, Boro, Azufre y Cal) basándose en las especificaciones técnicas de cada uno. Los pesticidas considerados fueron fungicidas, insecticidas y herbicidas. El precio promedio de riego por hectárea fue transformado a consumo de electricidad en kilovatios hora (kWh) por hectárea, y el consumo de combustible en megajulios (MJ) por hectárea. En las actividades agrícolas se considera una hectárea dividida por el rendimiento ( $\text{ha rendimiento}^{-1}$ ) para cada labor.

Tabla A1. Cantidades requeridas para la producción de 1 kg de remolacha azucarera.

Entradas	Cantidad	Unidad
Insumos		
Semillas	2,77E-06	kg
Nitrógeno	2,01E-03	kg
Fosforo	3,53E-03	kg
Potasio	7,73E-07	kg
Zinc	2,86E-07	kg
Boro	1,20E-06	kg
Azufre	1,04E-03	kg
Cal	8,53E-04	kg
Fungicidas	2,73E-05	kg
Insecticidas	1,54E-05	kg
Herbicidas	1,49E-04	kg
Energía		
Electricidad	1,64E-02	kWh
Diésel	3,19E-02	MJ
Actividades agrícolas		
Plantación	9,95E-06	ha
Labranza	9,95E-06	ha
Aradura	9,95E-06	ha
Rastraje	9,95E-06	ha
Aplicación de fertilizante	9,95E-06	ha
Aplicación de pesticidas	9,95E-06	ha
Cosecha	9,95E-06	ha
Envasado de insumos		
Fertilizantes	7,43E-03	kg
Pesticidas	1,92E-04	kg

Fuente: Elaboración propia.

## 8.2. Producción de azúcar blanco de remolacha

En Tabla A2 se muestra la cantidad de co-productos generados por un kilogramo de azúcar blanco durante la temporada 2023 para realizar la Asignación Económica. Se consideró la producción de los co-productos generados y se relacionó con la producción de azúcar blanco de remolacha la cual es de 88.232,8 toneladas.

Tabla A2. Co-productos generados en la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha.

Co-productos	Cantidad	Unidad
Melaza	0,27	kg
Coseta seca	0,27	kg
Cal	0,32	kg

Fuente: Elaboración propia.

En Tabla A3 se muestran las cantidades necesarias en cada operación y la materia prima para la producción de 1 kg azúcar blanco durante la temporada de 2023. En las operaciones se encuentran los insumos, la energía, el envase y los residuos, en relación con la producción de azúcar blanco. En las entradas los insumos están kg, la electricidad en kWh y los combustibles en MJ. El envase corresponde a una bolsa de PEBD que pesa 5 gramos. Las salidas del proceso incluyeron el volumen de aguas residuales, medido en metros cúbicos, y la cantidad de residuos destinados a reciclaje, compostaje e incineración, cuantificados en kilogramos. En el caso de la materia prima, toda la remolacha azucarera procesada en el período se dividió entre la producción total de azúcar blanco de remolacha.

Tabla A3. Entradas y salidas para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha.

Entradas	Cantidad	Unidad
Materia prima		
Remolacha azucarera	6,76	kg
Insumos		
Ceniza de soda pesada	1,10E-02	kg
Anhídrido sulfuroso a granel	1,41E-03	kg
Químicos auxiliares	2,16E-03	kg
Ácido sulfúrico de 98%	6,49E-04	kg
Soda cáustica líquida	2,99E-04	kg
Sal industrial	2,59E-04	kg
Floculante bufloc - 565 pwg	1,31E-04	kg
Cal viva	3,16E-02	kg
Caliza cap	2,18E-01	kg
Energía		
Carbón coque	5,86E-01	MJ
Carbón	8,98	MJ
Diesel	2,28E-02	MJ
Gas licuado de petróleo	5,32E-03	MJ
Petróleo	8,61E-02	MJ
Electricidad	1,66E-02	kWh
Envase		
Bolsa PEBD	5,00E-03	kg
Salidas		
Residuos		
Aguas residuales	2,49E-02	m <sup>3</sup>
Biorresiduos	2,30E-02	kg
Papel y cartón	5,03E-05	kg
Residuo sólido	2,02E-03	kg
Total residuos no peligrosos	2,51E-02	kg
Total de residuos peligrosos	8,02E-05	kg

Fuente: Elaboración propia.

### 8.3. Transporte

En la Tabla A4 se consideró el transporte de insumos agrícolas para la producción de remolacha, transporte de remolacha a fábrica y transporte de azúcar blanco de 1 kg a Santiago Centro. La unidad de medida utilizada para el transporte es la tonelada por kilómetro (tkm), la cual relaciona el peso por la distancia recorrida. Para el transporte de los insumos se multiplicó el total de insumos en toneladas por la distancia recorrida hasta los campos (83 km). Para el transporte de remolacha a fábrica, se multiplicó la cantidad de materia prima necesaria para 1 kg de azúcar blanco en toneladas por la distancia recorrida hasta fábrica (83 km). Finalmente, para el transporte de azúcar blanco a Santiago Centro se tomó 1 kg de azúcar blanco en toneladas para luego multiplicarlo por los 356 km de transporte.

Tabla A4. Transporte de insumos, materia prima y azúcar blanco.

Entradas	Cantidad	Unidad
Transporte de fertilizantes y pesticidas	6,33E-04	tkm
Transporte remolacha planta	5,61E-01	tkm
Transporte a Santiago centro	3,56E-01	tkm

Fuente: Elaboración propia.

### 8.4. Reemplazo de carbón por biomasa

Un 78% del carbón combustible fue destinado a calderas en la temporada 2023 de la etapa de producción de azúcar blanco de remolacha, este porcentaje se aplicó a la energía total entregada por el carbón, con un aporte total de 8,98 MJ, quedando que 6,95 MJ serán reemplazados por una cantidad

equivalente de biomasa. Luego, para la recomendación final toda la energía entregada por el carbón fue reemplazada por biomasa, es decir, los 8,98 MJ.

## 8.5. Capturas de pantalla

Las capturas de pantalla muestran el detalle de los datos ingresados para el proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco, y las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) antes de la aplicación de la Asignación Económica, calculadas utilizando el software openLCA.

Entradas						
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Proveedor por defecto		
Application of plant protection pro...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	9.95000E-6	ha	market for application of plant protection product, by field sprayer - GLO		
Boric acid, anhydrous, powder (GLO)...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	1.20000E-6	kg	market for boric acid, anhydrous, powder - GLO		
Diesel, burned in agricultural machi...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.03187	MJ	market for diesel, burned in agricultural machinery - GLO		
Electricity, medium voltage (CL) m...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.01640	kWh	market for electricity, medium voltage - CL		
Fertilising, by broadcaster (GLO) m...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	9.95000E-6	ha	market for fertilising, by broadcaster - GLO		
Harvesting, by complete harvester, ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	9.95000E-6	ha	harvesting, by complete harvester, beets - CH		
Hoeing (GLO) market for   Cut-off, ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	9.95000E-6	ha	market for hoeing - GLO		
Lime (RoW) market for lime   Cut-...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00085	kg	market for lime - RoW		
Nitrogen fertiliser, as N (GLO) mark...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00201	kg	market for nitrogen fertiliser, as N - GLO		
Packaging, for fertilisers or pesticid...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00743	kg	market for packaging, for fertilisers or pesticides - GLO		
Packaging, for fertilisers or pesticid...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00019	kg	market for packaging, for fertilisers or pesticides - GLO		
Pesticide, unspecified (GLO) market...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00015	kg	market for pesticide, unspecified - GLO		
Pesticide, unspecified (GLO) market...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	1.54000E-5	kg	market for pesticide, unspecified - GLO		
Pesticide, unspecified (GLO) market...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	2.73000E-5	kg	market for pesticide, unspecified - GLO		
Phosphate fertiliser, as P2O5 (GLO) ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00353	kg	market for phosphate fertiliser, as P2O5 - GLO		
Potassium fertiliser, as K2O (GLO) ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	7.73000E-7	kg	market for potassium fertiliser, as K2O - GLO		
Sowing (GLO) market for   Cut-off, ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	9.95000E-6	ha	market for sowing - GLO		
Sulfur (GLO) market for   Cut-off, S ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00104	kg	market for sulfur - GLO		
Tillage, harrowing, by spring tine ha...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	9.95000E-6	ha	market for tillage, harrowing, by spring tine harrow - GLO		
Tillage, ploughing (GLO) market fo...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	9.95000E-6	ha	market for tillage, ploughing - GLO		
Zinc monosulfate (RoW) market fo...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	2.86000E-7	kg	market for zinc monosulfate - RoW		

Salidas							
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Costes/Ingresos	Incertidumbre	Producto evitado	Proveedor por de...
remolacha cultivo		1.00000	kg		none		

Figura 11. Datos de entrada y salida al software openLCA para la producción de 1 kg de remolacha.

Contribución	Proceso	Required amount	Total result [kg CO2 eq]	Direct contribution [kg CO2 eq]
100.00%	Remolacha cultivo - CL	6.76000 kg	0.36030	
37.32%	market for nitrogen fertiliser, as N - GLO	0.01359 kg	0.13448	0.13448
18.73%	market for electricity, medium voltage - CL	0.39911 MJ	0.06750	0.06750
12.11%	market for phosphate fertiliser, as P2O5 - GLO	0.02386 kg	0.04364	0.04364
10.96%	market for diesel, burned in agricultural machinery - GLO	0.21544 MJ	0.03947	0.03947
08.46%	harvesting, by complete harvester, beets - CH	0.67262 m2	0.03047	0.03047
03.94%	market for packaging, for fertilisers or pesticides - GLO	0.05152 kg	0.01418	0.01418
03.55%	market for pesticide, unspecified - GLO	0.00130 kg	0.01278	0.01278
02.30%	market for tillage, ploughing - GLO	0.67262 m2	0.00827	0.00827
00.50%	market for tillage, harrowing, by spring tine harrow - GLO	0.67262 m2	0.00181	0.00181
00.49%	market for fertilising, by broadcaster - GLO	0.67262 m2	0.00178	0.00178
00.47%	market for sowing - GLO	0.67262 m2	0.00169	0.00169
00.45%	market for sulfur - GLO	0.00703 kg	0.00161	0.00161
00.43%	market for hoeing - GLO	0.67262 m2	0.00154	0.00154
00.23%	market for application of plant protection product, by field sprayer - GLO	0.67262 m2	0.00082	0.00082
00.06%	market for lime - RoW	0.00577 kg	0.00023	0.00023
00.00%	market for boric acid, anhydrous, powder - GLO	8.11200E-6 kg	8.26807E-6	8.26807E-6
00.00%	market for potassium fertiliser, as K2O - GLO	5.22548E-6 kg	1.77899E-6	1.77899E-6
00.00%	market for zinc monosulfate - RoW	1.93336E-6 kg	1.38304E-6	1.38304E-6

Figura 12. Emisiones de GEI para la producción de 6,76 kg de remolacha obtenidas en software openLCA.

Entradas							
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Proveedor por defecto			
Chemical, organic (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO	Others/...	0.00216	kg	market for chemical, organic - GLO			
Electricity, medium voltage (CL) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - CL	Others/...	0.01660	KWh	market for electricity, medium voltage - CL			
Heat, central or small-scale, natural gas (GLO) propane extraction, from liquefied petroleum...	Others/...	0.00530	MJ	propane extraction, from liquefied petroleum gas - GLO			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) heat production, at coal coke ind...	Others/...	0.58600	MJ	heat production, at coal coke industrial furnace 1-10MW - RoW			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) heat production, heavy fuel oil, at...	Others/...	0.08610	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) heat production, light fuel oil, at i...	Others/...	0.02280	MJ	heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW			
Lime (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO	Others/...	0.03160	kg	market for lime - GLO			
Limestone, crushed, washed (CH) market for limestone, crushed, washed   Cut-off, S - Copi...	Others/...	0.21820	kg	market for limestone, crushed, washed - CH			
Polyacrylamide (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO	Others/...	0.00013	kg	market for polyacrylamide - GLO			
Polyethylene, low density, granulate (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent ...	Others/...	0.00500	kg	market for polyethylene, low density, granulate - GLO			
Soda ash, light, crystalline, heptahydrate (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoin...	Others/...	0.01100	kg	market for soda ash, light, crystalline, heptahydrate - GLO			
Sodium chloride, powder (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO	Others/...	0.00026	kg	market for sodium chloride, powder - GLO			
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (GLO) market for   Cut-off, S - Cop...	Others/...	0.00030	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state - GLO			
Sulfur dioxide, liquid (RER) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER	Others/...	0.00141	kg	market for sulfur dioxide, liquid - RER			
Sulfuric acid (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO	Others/...	0.00065	kg	market for sulfuric acid - GLO			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) heat production, at hard coal ind...	Others/...	8.98000	MJ	heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW - RoW			

Salidas								
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Costes/Ingresos	Incertidumbre	Producto evitado	Proveedor por de...	Entrada de calida...
<b>1 kg de azúcar remolacha</b>		<b>1.00000</b>	<b>kg</b>		<b>none</b>			
Bio waste (CH) treatment of biowas...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.02300	kg		none			
Hazardous waste, for incineration [...]	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00010	kg		none			
Municipal solid waste (CH) treatm...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.02510	kg		none			
Municipal solid waste (RoW) treat...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00200	kg		none			
Paper (waste treatment) (GLO) recy...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00010	kg		none			
Wastewater, average (GLO) market ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.02490	m3		none			

Figura 13. Datos entrada y salida al software openLCA para la producción de 1 kg azúcar blanco de remolacha.

Contribución	Proceso	Required amount	Total result [kg CO2 eq]	Direct contribution [kg CO2 eq]
100.00%	1 kg de azúcar remolacha - CL	1.00000 kg	1.36878	
90.28%	heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW - RoW	8.98000 MJ	1.23575	1.23575
06.42%	heat production, at coal coke industrial furnace 1-10MW - RoW	0.58600 MJ	0.08794	0.08794
00.83%	market for polyethylene, low density, granulate - GLO	0.00500 kg	0.01134	0.01134
00.74%	market for electricity, medium voltage - CL	0.05976 MJ	0.01011	0.01011
00.61%	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW	0.08610 MJ	0.00833	0.00833
00.37%	market for soda ash, light, crystalline, heptahydrate - GLO	0.01100 kg	0.00512	0.00512
00.30%	market for chemical, organic - GLO	0.00216 kg	0.00407	0.00407
00.15%	heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW	0.02280 MJ	0.00210	0.00210
00.09%	market for lime - GLO	0.03160 kg	0.00130	0.00130
00.08%	market for limestone, crushed, washed - CH	0.21820 kg	0.00108	0.00108
00.04%	market for sulfur dioxide, liquid - RER	0.00141 kg	0.00052	0.00052
00.03%	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state - GLO	0.00030 kg	0.00041	0.00041
00.03%	market for polyacrylamide - GLO	0.00013 kg	0.00037	0.00037
00.01%	propane extraction, from liquefied petroleum gas - GLO	0.00530 MJ	0.00015	0.00015
00.01%	market for sulfuric acid - GLO	0.00065 kg	0.00011	0.00011
00.01%	market for sodium chloride, powder - GLO	0.00026 kg	7.19076E-5	7.19076E-5

Figura 14. Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha.

Entradas					
Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Proveedor p...	Descripción
Transport, freight, lorry 1...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00063	t*km	market f...	Insumos
Transport, freight, lorry 1...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.56100	t*km	market f...	Remolacha a planta
Transport, freight, lorry 1...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.35600	t*km	market f...	Azúcar de 1 kg Santiago

Figura 15. Datos de entrada al software openLCA para el transporte.

Contribución	Proceso	Required amount	Total result [kg CO2 eq]
100.00%	TRANSPORTE	1.00000 kg	0.15222
> 61.14%	Transporte remolacha	1.00000 kg	0.09306
> 38.80%	Transporte azúcar 1 kg	1.00000 kg	0.05905
> 00.07%	Transporte insumos	1.00000 kg	0.00011

Figura 16. Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA para el transporte.



## Entradas

Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Proveedor p...	Entrada de ...	Ubicación	Descrip
Chemical, organic (GLO) market for   Cut-off, S - Copied fr...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00216	kg	market f...			
Electricity, medium voltage (CL) market for   Cut-off, S - C...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.01660	kWh	market f...			
Heat, central or small-scale, natural gas (GLO) propane ex...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00530	MJ	propane ...			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) h...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.58600	MJ	heat pro...			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) h...	Others/Ecoinvent cut-off S...	6.95000	MJ	heat pro...			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) h...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.08610	MJ	heat pro...			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) h...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.02280	MJ	heat pro...			
Lime (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinven...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.03160	kg	market f...			
Limestone, crushed, washed (CH) market for limestone, cr...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.21820	kg	market f...			
Polyacrylamide (GLO) market for   Cut-off, S - Copied fro...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00013	kg	market f...			
Polyethylene, low density, granulate (GLO) market for   Cut...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00500	kg	market f...			
Soda ash, light, crystalline, heptahydrate (GLO) market for ...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.01100	kg	market f...			
Sodium chloride, powder (GLO) market for   Cut-off, S - C...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00026	kg	market f...			
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (G...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00030	kg	market f...			
Sulfur dioxide, liquid (RER) market for   Cut-off, S - Copie...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00141	kg	market f...			
Sulfuric acid (GLO) market for   Cut-off, S - Copied from E...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00065	kg	market f...			
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW) h...	Others/Ecoinvent cut-off S...	2.03000	MJ	heat pro...			

## Salidas

Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Proveedor p...	Entrada de ...	Ubicación	Descrip
<b>1 kg de azúcar remolacha</b>		<b>1.00000</b>	<b>kg</b>				
Biowaste (CH) treatment of biowaste, industrial composti...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.02300	kg				
Hazardous waste, for incineration (Europe without Switzer...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00010	kg				
Municipal solid waste (CH) treatment of, incineration - CH	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.02510	kg				
Municipal solid waste (RoW) treatment of, sanitary landfil...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00200	kg				
Paper (waste treatment) (GLO) recycling of paper   Cut-of...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00010	kg				
Wastewater, average (GLO) market for   Cut-off, S - Copie...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.02490	m3				

Figura 19. Datos de entrada y salida al software OpenLCA para la producción de 1 kg azúcar blanco de remolacha reemplazando el carbón de caldera por biomasa.

Contribución	Proceso	Required amount	Total result [kg CO2 eq]	Direct contribution [kg CO2 eq]
✓ 100.00%	1 kg de azúcar remolacha - CL	1.00000 kg	0.47129	
59.27%	heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW - RoW	2.03000 MJ	0.27935	0.27935
18.66%	heat production, at coal coke industrial furnace 1-10MW - RoW	0.58600 MJ	0.08794	0.08794
12.50%	heat production, hardwood chips from forest, at furnace 1000kW - RoW	6.95000 MJ	0.05891	0.05891
02.41%	market for polyethylene, low density, granulate - GLO	0.00500 kg	0.01134	0.01134
02.14%	market for electricity, medium voltage - CL	0.05976 MJ	0.01011	0.01011
01.77%	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW	0.08610 MJ	0.00833	0.00833
01.09%	market for soda ash, light, crystalline, heptahydrate - GLO	0.01100 kg	0.00512	0.00512
00.86%	market for chemical, organic - GLO	0.00216 kg	0.00407	0.00407
00.45%	heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW	0.02280 MJ	0.00210	0.00210
00.28%	market for lime - GLO	0.03160 kg	0.00130	0.00130
00.23%	market for limestone, crushed, washed - CH	0.21820 kg	0.00108	0.00108
00.11%	market for sulfur dioxide, liquid - RER	0.00141 kg	0.00052	0.00052
00.09%	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state - GLO	0.00030 kg	0.00041	0.00041
00.08%	market for polyacrylamide - GLO	0.00013 kg	0.00037	0.00037
00.03%	propane extraction, from liquefied petroleum gas - GLO	0.00530 MJ	0.00015	0.00015
00.02%	market for sulfuric acid - GLO	0.00065 kg	0.00011	0.00011
00.02%	market for sodium chloride, powder - GLO	0.00026 kg	7.19076E-5	7.19076E-5

Figura 20. Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA del proceso de producción de azúcar blanco de remolacha reemplazando el carbón de caldera por biomasa.

Contribución	Proceso	Required amount	Total result [kg CO2 eq]
✓ 100.00%	🔗 Huella total - CL	1.00000 kg ■	0.98381
> 47.90%	🔗 1 kg de azúcar remolacha - CL	1.00000 kg ■	0.47129
> 36.62%	🔗 Remolacha cultivo - CL	6.76000 kg ■	0.36030
> 15.47%	🔗 Transporte - CL	1.00000 kg ■	0.15222

Figura 21. Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA del proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo del carbón de caldera por biomasa.

Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Proveedor p...	Entrada de ...
🔗 Chemical, organic (GLO)  market for   Cut-off, S - Cop...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00216	kg	🔗 market f...	
🔗 Electricity, medium voltage (CL)  market for   Cut-off, ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.01660	kWh	🔗 market f...	
🔗 Heat, central or small-scale, natural gas (GLO)  propa...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00530	MJ	🔗 propane ...	
🔗 Heat, district or industrial, other than natural gas (Ro...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.58600	MJ	🔗 heat pro...	
🔗 Heat, district or industrial, other than natural gas (Ro...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.08610	MJ	🔗 heat pro...	
🔗 Heat, district or industrial, other than natural gas (Ro...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.02280	MJ	🔗 heat pro...	
🔗 Lime (GLO)  market for   Cut-off, S - Copied from Ecoi...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.03160	kg	🔗 market f...	
🔗 Limestone, crushed, washed (CH)  market for limesto...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.21820	kg	🔗 market f...	
🔗 Polyacrylamide (GLO)  market for   Cut-off, S - Copied...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00013	kg	🔗 market f...	
🔗 Polyethylene, low density, granulate (GLO)  market for...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00500	kg	🔗 market f...	
🔗 Soda ash, light, crystalline, heptahydrate (GLO)  mark...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.01100	kg	🔗 market f...	
🔗 Sodium chloride, powder (GLO)  market for   Cut-off, ...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00026	kg	🔗 market f...	
🔗 Sodium hydroxide, without water, in 50% solution sta...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00030	kg	🔗 market f...	
🔗 Sulfur dioxide, liquid (RER)  market for   Cut-off, S - C...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00141	kg	🔗 market f...	
🔗 Sulfuric acid (GLO)  market for   Cut-off, S - Copied fr...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	0.00065	kg	🔗 market f...	
🔗 Heat, district or industrial, other than natural gas (Ro...	Others/Ecoinvent cut-off S copy	8.98000	MJ	🔗 heat pro...	

#### Salidas

Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad	Proveedor p...	Entrada de ...
🔗 <b>1 kg de azúcar remolacha</b>		<b>1.00000</b>	<b>kg</b>		
🔗 Biowaste (CH)  treatment of biowaste, industrial com...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.02300	kg		
🔗 Hazardous waste, for incineration (Europe without Sw...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00010	kg		
🔗 Municipal solid waste (CH)  treatment of, incineration...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.02510	kg		
🔗 Municipal solid waste (RoW)  treatment of, sanitary la...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00200	kg		
🔗 Paper (waste treatment) (GLO)  recycling of paper   C...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.00010	kg		
🔗 Wastewater, average (GLO)  market for   Cut-off, S - C...	Others/Ecoinvent cut-off S...	0.02490	m3		

Figura 22. Entradas y salidas en software openLCA para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo de todo el carbón por biomasa.

Contribución	Proceso	Required amount	Total result [kg CO2 eq]	Direct contribution [kg CO2 eq]
100.00%	1 kg de azúcar remolacha - CL	1.00000 kg	0.20914	
42.05%	heat production, at coal coke industrial furnace 1-10MW - RoW	0.58600 MJ	0.08794	0.08794
36.40%	heat production, hardwood chips from forest, at furnace 1000kW - RoW	8.98000 MJ	0.07612	0.07612
05.42%	market for polyethylene, low density, granulate - GLO	0.00500 kg	0.01134	0.01134
04.83%	market for electricity, medium voltage - CL	0.05976 MJ	0.01011	0.01011
03.98%	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW	0.08610 MJ	0.00833	0.00833
02.45%	market for soda ash, light, crystalline, heptahydrate - GLO	0.01100 kg	0.00512	0.00512
01.94%	market for chemical, organic - GLO	0.00216 kg	0.00407	0.00407
01.00%	heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW - RoW	0.02280 MJ	0.00210	0.00210
00.62%	market for lime - GLO	0.03160 kg	0.00130	0.00130
00.52%	market for limestone, crushed, washed - CH	0.21820 kg	0.00108	0.00108
00.25%	market for sulfur dioxide, liquid - RER	0.00141 kg	0.00052	0.00052
00.19%	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state - GLO	0.00030 kg	0.00041	0.00041
00.18%	market for polyacrylamide - GLO	0.00013 kg	0.00037	0.00037
00.07%	propane extraction, from liquefied petroleum gas - GLO	0.00530 MJ	0.00015	0.00015
00.05%	market for sulfuric acid - GLO	0.00065 kg	0.00011	0.00011
00.03%	market for sodium chloride, powder - GLO	0.00026 kg	7.19076E-5	7.19076E-5

Figura 23. Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA para la producción de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo de todo el carbón por biomasa.

Contribución	Proceso	Required amount	Total result [kg CO2 eq]
100.00%	Huella total - CL	1.00000 kg	0.72166
> 49.93%	Remolacha cultivo - CL	6.76000 kg	0.36030
> 28.98%	1 kg de azúcar remolacha - CL	1.00000 kg	0.20914
> 21.09%	Transporte - CL	1.00000 kg	0.15222

Figura 24. Emisiones de GEI obtenidas en software openLCA del proceso productivo de 1 kg de azúcar blanco de remolacha con reemplazo de todo el carbón por biomasa.