

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento: Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Evaluación técnica, económica y ambiental de la
producción de ácido cítrico a partir de miel de caña de
azúcar.**

Autora: Laura María Pérez Martín

Tutores: Dra. C. Maylier Pérez Gil

Dr. C. Néstor Ley Chong

2018-2019

Santa Clara, Julio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Academic Department: Chemical engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Technical, economic and environmental evaluation
of the production of citric acid starting from honey of cane
of sugar.

Author: Laura María Pérez Martín

Thesis Director: Dra. C. Maylier Pérez Gil

Dr. C. Néstor Ley Chong

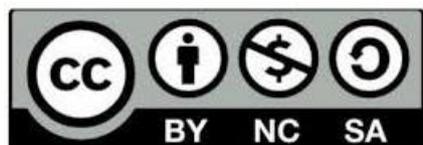
2018-2019

Santa Clara, July, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

Cuando estamos motivados por metas que tienen un significado profundo, por sueños que necesitan completarse, por puro amor que necesita expresarse, entonces vivimos verdaderamente la vida.

Greg Anderson

Dedicatoria

A Dios, por ser mi principal fuente de apoyo y la luz en los momentos de oscuridad.

A mi familia, por los desvelos, los sacrificios y la confianza que siempre depositaron en mí.

A mis padrinos, Liset y Daniel, que desde el cielo siempre me han cuidado y han guiado mis pasos.

A mi novio, por su sonrisa de cada día y por este maravilloso tiempo juntos.

Agradecimientos

A mi madre, por ser la responsable de mi existencia, ejemplo de sacrificio y abnegación, mi guía, consejera y amiga.

A mi padre, por ser mi mayor ejemplo de superación y el pilar detrás de todos mis logros.

A mis hermanas, amigas y confidentes de toda la vida.

A mis sobrinos, Daniel y David, que siempre han logrado sacarme una sonrisa, aún en los momentos de mayor estrés.

A mis abuelos: Alicia, Rey, Irma y José, por sus sabios consejos y por ese cariño que solo los abuelos saben brindar.

A mis tías: Diene, Midiala y Susana, por el apoyo que siempre me han brindado y por poder contar con ellas en todo momento.

A mis primos, mi tío y mis cuñados: que siempre han estado presentes en cada paso de mi formación.

A mi novio, por estar todo este tiempo y levantarme el ánimo cuando pensé que ya no podía seguir.

A mis tutores, por su paciencia, su entrega y el gran aporte realizado en mi formación profesional.

A Julio, Ronald y Denis, compañeros de andanzas y de estudios, por hacer que estudiar fuera divertido, por sus consejos y la ayuda que siempre me brindaron.

A mis compañeros de aula, por las experiencias compartidas en estos años juntos.

A mis viejas amistades, sobre todo a Rachel y Tailenys, por estar al pendiente de mí en todo momento.

A todos mis profesores, por su entrega y por los conocimientos aportados para mi formación como ingeniera.

En fin, gracias a todos los que han hecho suyo este sueño y me han ayudado a cumplirlo.

Resumen

El ácido cítrico es un producto de alta demanda en el mercado nacional y mundial debido a sus extendidos usos y su gran variedad de aplicaciones en diferentes esferas como la industria alimentaria, farmacéutica, textil y de cosméticos. Este ácido se puede obtener a partir de distintas fuentes de materias primas, fundamentalmente de sustratos azucarados. El presente trabajo tiene como objetivo fundamental la evaluación técnica, económica y ambiental de una planta de producción de ácido cítrico a partir de miel final de caña de azúcar, integrado al proceso de producción de azúcar crudo en la UEB Uruguay, perteneciente al municipio Jatibonico, provincia Sancti Spíritus. Se realizaron los balances de masa y energía en la UEB y en la planta de ácido cítrico para una capacidad de 5 000 t/a. Para esta última se estableció el esquema tecnológico con las principales etapas del proceso a partir de las cuales se realizó el análisis técnico económico y ambiental usando de la metodología del Peters & Timmerhaus y el análisis de ciclo de vida (ACV). Como resultado se obtuvo que la planta no es económicamente factible a la capacidad de producción instalada, pero con el estudio realizado se aprecia que esto se puede revertir con un aumento de esta capacidad de producción y se obtiene impacto ambiental perjudicial para el medio ambiente de forma global, a pesar de obtener beneficios en la categoría de daños "recursos".

Palabras clave: ácido cítrico, miel final, integración, evaluación económica, ACV

Abstract

Citric acid is a product of high demand in the national and world market due to its widespread uses and its wide variety of applications in different spheres such as the food, pharmaceutical, textile and cosmetics industries. This acid can be obtained from different sources of raw materials, mainly from sweetened substrates. The present work has as fundamental objective the technical, economic and environmental evaluation of a citric acid production plant from final sugar cane honey, integrated to the raw sugar production process in UEB Uruguay, belonging to Jatibonico municipality, Sancti Spíritus province. Mass and energy balances were carried out at the UEB and at the citric acid plant for a capacity of 5,000 t/a. For the latter, the technological scheme was established with the main stages of the process from which the economic and environmental technical analysis was carried out using the Peters & Timmerhaus methodology and the life cycle assessment (LCA) analysis. As a result it was obtained that the plant is not economically feasible to the capacity of installed production, but with the carried out study it is appreciated that this you can revert with an increase of this production capacity and harmful environmental impact is obtained for the environment in a global way, in spite of obtaining benefits in the category of damages "resources."

Keywords: citric acid, final honey, integration, economic evaluation, LCA

Índice

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I: Revisión Bibliográfica.....	2
1.1 Ácido cítrico: características y aplicaciones.....	2
1.2 Producción de ácido cítrico a partir de diferentes materias primas.....	3
1.2.1 Azúcar de caña de azúcar	4
1.2.2 Melazas de remolacha.....	6
1.2.3 Suero Láctico.....	6
1.2.4 Bagazo de caña de azúcar.....	8
1.2.5 Otras materias primas.....	10
1.2.6 Miel final de caña de azúcar	10
1.3 Usos actuales de la miel final como materia prima para diferentes productos	12
1.4 Situación actual de la industria azucarera y sus derivados	12
1.5 Análisis de tecnologías.....	13
1.6 Herramientas de evaluación ambiental	14
1.6.1 Análisis del ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental	15
1.6.2 Características del ACV	15
1.6.3 Casos de ACV.....	16
Conclusiones Parciales:	17
Capítulo II: Cuantificación de los flujos del proceso	18
2.1 Justificación de la propuesta	18
2.2 Descripción del proceso de producción de la UEB Uruguay.....	18
2.3 Descripción del proceso de producción de ácido cítrico a partir de miel final	20
2.4 Cuantificación de los flujos del proceso	24
Conclusiones parciales:	40
Capítulo III: Análisis económico y ambiental de la planta de producción de ácido cítrico	41
3.1 Análisis económico de la planta de producción de ácido cítrico	41
3.1.1 Estudio de capacidad de la planta de producción de ácido cítrico	44
3.2 Evaluación ambiental del ciclo de vida del ácido cítrico a partir de miel final	48
3.2.1 Definición del Objetivo y Alcance del estudio	48
3.2.2 Análisis del inventario del ciclo de vida (AICV)	49
3.2.3 Evaluación de Impactos.....	53

3.2.4 Interpretación	53
3.2.5 Propuesta de mejoras	58
Conclusiones parciales:	58
Conclusiones generales:	60
Recomendaciones:	61
Bibliografía	62
Anexos	67

INTRODUCCIÓN

En Cuba, a partir de la actualización del modelo económico, se ejecutan acciones para el rescate de la producción de azúcar y derivados como principales contribuyentes al desarrollo de la economía nacional. En el pasado, se producía azúcar como producto principal, fabricándose actualmente una variedad de co-productos y derivados. La industria azucarera se presenta como una opción factible para la diversificación de la industria química en Cuba a partir de la disponibilidad de productos y co-productos de alto valor agregado (Contreras and Rosa, 2009, Pérez et al., 2016, Guerra, 2018). La mayoría de las fábricas de azúcar se autoabastecen energéticamente y exportan el excedente, favoreciendo la integración energética de otras producciones a la de azúcar crudo.

El empleo de las mieles y el bagazo para producir etanol y electricidad, ha sido ampliamente estudiado en Cuba como alternativas para la reducción de importaciones; así como para la disminución del consumo de combustibles fósiles, no así la producción de ácido cítrico a partir de estos co-productos ricos en azúcares.

El ácido cítrico es un ácido orgánico muy frecuente en la naturaleza siendo un intermediario en el ciclo de los ácidos tricarbónicos (o ciclo de Krebs), el cual está presente en gran cantidad de frutas (González, 2015, Travers et al., 2015). A principios del siglo XX, la obtención del ácido cítrico se hacía a partir de limones, pero a mediados del período la rentabilidad del proceso disminuyó, optándose por la producción mediante la fermentación de un microorganismo, principalmente el *Aspergillus niger* (Gómez, 2012, Reyes et al., 2013, Rosas and Terán, 2015, Travers et al., 2015, Patel and Pandya, 2017). La producción industrial de este ácido por métodos fermentativos, reporta mayores rendimientos que los procesos convencionales de síntesis química en función del sustrato empleado (González, 2015, Travers et al., 2015, Patel and Pandya, 2017).

Actualmente, es uno de los ácidos de mayor demanda y producción a nivel mundial debido a su diversidad de empleo principalmente en la industria alimentaria, farmacéutica, textil, cosmética, agrícola y química en general (SOCCOL et al., 2006, Swain et al., 2014, Travers et al., 2015, Patel and Pandya, 2017). Es preciso señalar, que en Cuba el ácido cítrico consumido es importado, ascendiendo a los 5,00E+06 kg/a (Guerra, 2018). Varios estudios han demostrado la factibilidad de integrar la producción de ácido cítrico a la de azúcar crudo, al ser esta industria la fuente de materia prima (LÓPEZ, 2005)(LÓPEZ GONZÁLEZ et al., 2006, Pérez et al., 2016, Guerra, 2018).

La Unidad Empresarial de Base (UEB) Uruguay, ubicada en el municipio de Jatibonico, perteneciente a la provincia Sancti Spíritus, presenta una capacidad potencial de molienda de 9,20E+06 kg/d, produciendo azúcar crudo de alta calidad y alimento animal (miel-urea-bagacillo). Dado la ubicación en

el centro del país de esta UEB, de su alta capacidad de molienda instalada y de la carencia de derivados, se identifica esta como una propuesta factible para diversificar su producción al integrar una planta para la producción de ácido cítrico. Esta alternativa de diversificación compite actualmente con la producción de alcohol de la Destilería “Paraíso” a partir de miel final. Por tanto, se hace necesario la evaluación técnica, económica y ambiental de una planta para la producción de ácido cítrico en la UEB Uruguay, lo cual garantizará cumplir con las demandas nacionales de este producto y reducir las importaciones, planteándose para esta investigación el siguiente problema científico:

Problema Científico:

En Cuba no se aprovecha la disponibilidad de las materias primas para la producción de ácido cítrico, producto de alta demanda en el mercado nacional.

Hipótesis:

La evaluación de una planta técnica, económica y ambientalmente factible para la producción del ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar integrada a la producción de azúcar crudo permitirá tomar decisiones de la posible instalación de la misma para suprimir la importación de este producto.

Objetivo General: Evaluar técnica, económica y ambientalmente una planta para la producción de ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar.

Objetivos Específicos:

1. Identificar las tecnologías para la producción de ácido cítrico a partir de diferentes materias primas.
2. Establecer el esquema tecnológico de una planta para la producción de ácido cítrico a partir de miel final integrada a la producción de azúcar crudo en la UEB Uruguay.
3. Evaluar la factibilidad económica de la planta para la producción de ácido cítrico a partir miel de caña de azúcar.
4. Evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida del ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

1.1 Ácido cítrico: características y aplicaciones

El ácido cítrico es un ácido orgánico tricarboxílico que está presente en la mayoría de las frutas, sobre todo en cítricos como el limón y la naranja. Su fórmula química es $C_6H_8O_7$. En bioquímica aparece como una molécula intermediaria en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, proceso realizado por la mayoría de los seres vivos (Rivada, 2008).

Es una sustancia orgánica producto del metabolismo de la mayoría de los seres vivos. Industrialmente se obtiene por fermentación de distintas materia primas, especialmente la melaza de caña.

Es un buen conservante y antioxidante natural que se añade industrialmente como aditivo en el envasado de muchos alimentos como las conservas vegetales enlatadas. El ácido cítrico es uno de los aditivos más utilizados por la industria alimentaria. En el mercado mundial, cerca del 90% del producto es elaborado por la Unión Europea, Estados Unidos y China (Mesa et al., 2005, Abstengo, 2018).

El ácido cítrico es un sólido translúcido o blanco, se ofrece en forma granular; es inodoro, sabor ácido fuerte no desagradable, fluorescente al aire seco. Cristaliza a partir de soluciones acuosas concentradas calientes en forma de grandes prismas rómbicos, con una molécula de agua, la cual pierde, cuando se calienta a $100^{\circ}C$, fundiéndose al mismo tiempo. A temperatura ambiente, el ácido cítrico es un polvo cristalino blanco. Puede existir en una forma anhidra (sin agua), o como monohidrato que contenga una molécula de agua por cada molécula de ácido cítrico. La forma anhidra se cristaliza en el agua caliente, mientras que la forma monohidrato cuando el ácido cítrico se cristaliza en el agua fría. El monohidrato se puede convertir a la forma anhidra calentándolo sobre $74^{\circ}C$ (BLANCO and HERRYMAN, 2005, Lugo, 2017). Las características típicas de un ácido cítrico anhidro comercial son:

Tabla 1.1 Características principales del ácido cítrico anhidro

Parámetro	Característica
Peso molecular	192,13 g/mol
Solubilidad	162 g/100 ml a $25^{\circ}C$
Humedad	0,3 % máximo
Metales Pesados	5 ppm máximo
Plomo	0,5 máximo
Arsénico	0,3 ppm máximo
Hierro	5 ppm máximo
Oxalatos, sulfatos y nitritos	Pasa la prueba
Retenido en tamiz malla 30	1 % máximo

Pasa tamiz malla 100

5 % máximo

(Rivada, 2008)

El ácido cítrico y sus sales denominadas citratos son usados principalmente en la industria de alimentos como acidulante para las bebidas gaseosas y para la preservación de otros alimentos, en la modificación de sabores, en la remoción de metales que causan turbiedad, elaboración de caramelos, postres jaleas y dulces. En el sector de cosméticos y productos de tocador es empleado como constituyente de formulaciones, en productos para el cuidado del cabello, perfumes, cremas, lociones, desodorantes, quita-esmaltes y jabones. Dentro del sector farmacéutico su mayor demanda pertenece a la elaboración de Alka Seltzer, pero también es usado para la estabilización de los ingredientes activos en las drogas, en jarabes, como un anticoagulante especial para bancos de sangre (Betancourt, 2003, Rodríguez, 2015, Alzand et al., 2017).

En el sector agroindustrial combinado con el sulfato de calcio se emplea para el tratamiento de terrenos y como dispersante en la aplicación de herbicidas y pesticidas. Industrialmente es utilizado en la elaboración de detergentes, en el teñido de tejidos, para el acabado de metales y en la separación de herrumbre y desincrustación. Además, se emplea para la remoción por electrólisis, en la galvanización de cobre, en bloques de construcción y para la separación de bióxido sulfuroso del gas de chimenea (Lugo, 2017).

En Cuba ha sido un producto utilizado desde hace tiempo siendo el mayor consumidor la industria alimentaria, en la cual se utiliza como saborizante y para garantizar la conservación de productos. También se han visto pasos de avance con vista al desarrollo de la industria farmacéutica y veterinaria jugando un papel importante la obtención de la materia prima necesaria para obtener dichos preparados, tanto naturales como sintético.

1.2 Producción de ácido cítrico a partir de diferentes materias primas

En la producción de ácido cítrico las materias primas se dividen en tres grupos fundamentales: azúcares, materiales amiláceos y mieles finales (Abstengo, 2018). En el primero están el azúcar crudo, el refino y la glucosa; en el segundo, el almidón de papa y los subproductos de la harina de tapioca, entre otras y, en el tercero, las mieles de caña y remolacha. Las más empleadas son las mieles de remolacha, las de caña y el azúcar (BLANCO and HERRYMAN, 2005).

Existen numerosos microorganismos productores de ácido cítrico, entre ellos bacterias, hongos y levaduras, aunque la mayoría de ellos no obtienen rendimientos aceptables comercialmente. La Tabla 1.2 muestra los microorganismos productores de ácido cítrico (Velásquez et al., 2010, Muñoz et al., 2014).

Tabla 1.2 Microorganismos productores de ácido cítrico.

	<i>Aspergillus</i>	<i>niger</i>
	<i>Aspergillus</i>	<i>aculeatus</i>
	<i>Aspergillus</i>	<i>awamori</i>
Hongos	<i>Aspergillus</i>	<i>carbonarius</i>
	<i>Aspergillus</i>	<i>wentii</i>
	<i>Aspergillus</i>	<i>foetidus</i>
	<i>Penicillium janthinelum</i>	
	<i>Saccharomicopsis lipolytica</i>	
	<i>Candida</i>	<i>tropicalis</i>
	<i>Candida</i>	<i>oleophila</i>
Levaduras	<i>Candida</i>	<i>guilliermondii</i>
	<i>Candida</i>	<i>parapsilosis</i>
	<i>Candida</i>	<i>citroformans</i>
	<i>Hansenula anamola</i>	
	<i>Bacillus</i>	<i>licheniformis</i>
Bacterias	<i>Arthrobacter</i>	<i>paraffinens</i>
	<i>Corynebacterium</i>	

(Rodríguez, 2015)

Según Rivada (2008), otras características del *Aspergillus niger* es su crecimiento en forma de esferas de 2 mm de diámetro, la cual se da a partir del quinto día de fermentación. A parte de ser una efectiva forma de reproducción, no aumenta la viscosidad del medio, lo cual favorece la agitación y la aireación (la forma globular consume menos oxígeno que la filamentosa) además da muchos menos problemas de crecimiento en paredes o en tuberías y la separación de biomasa formada por filtración es más efectiva.

1.2.1 Azúcar de caña de azúcar

El azúcar es un endulzante de origen natural, sólido, cristalizado, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa, es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa. El azúcar se puede clasificar por su grado de refinación. Normalmente, la refinación se expresa visualmente a través del color (azúcar moreno, azúcar rubio, blanco), que está dado principalmente por el porcentaje de sacarosa que contienen los cristales.

- Azúcar prieto (también llamada "azúcar moreno", "azúcar negro" o "azúcar crudo") se obtiene del jugo de caña de azúcar y no se somete a refinación, solo cristalizado y centrifugado. Este producto integral, debe su color a una película de melaza que envuelve cada cristal. Normalmente tiene entre 96 y 98 grados de sacarosa. Su contenido de mineral es ligeramente superior al azúcar blanco, pero muy inferior al de la melaza.
- Azúcar rubio, es menos oscuro que el azúcar moreno o crudo y con un mayor porcentaje de sacarosa.
- Azúcar blanco, con 99,5 % de sacarosa. También denominado azúcar sulfitada.
- Azúcar refinado o extra blanco es altamente pura, es decir, entre 99,8 y 99,9 % de sacarosa. El azúcar rubio se disuelve, se le aplican reactivos como fosfatos, carbonatos, cal para extraer la mayor cantidad de impurezas, hasta lograr su máxima pureza. En el proceso de refinamiento se desechan algunos de sus nutrientes complementarios, como minerales y vitaminas.

La producción de ácido cítrico a partir de azúcar fue estudiada por Balderrama-Martínez et al. donde utilizaron la cepa de *Aspergillus Niger* CDBBH180 productora de ácido cítrico para la obtención de este producto en el laboratorio empleando sacarosa como sustrato. La producción del ácido cítrico se evaluó en un medio de cultivo utilizando 190 g/L de sacarosa a 28°C, y su concentración alcanzó un valor máximo de 45 g/L. La eficiencia de la fermentación fue del 80 % y durante esta etapa el valor de pH se mantuvo estable en valores cercanos a 2,5. Se estudió la influencia de la edad del inóculo (72, 96, 112, 120 y 144 h), del volumen de inóculo (2,5; 5 y 7 %), del volumen de medio (20 y 40 %) y de la aireación (cultivo sumergido y superficial), sobre la producción de ácido cítrico por *Aspergillus Niger* O-5. Las mayores producciones de ácido cítrico fueron obtenidas con un volumen efectivo de medio del 20 %, un volumen de inóculo del 5 % con una edad de 112 h. El cultivo sumergido favoreció el crecimiento del hongo y su producción de ácido cítrico se incrementó en casi 5 g/L con relación al cultivo superficial a los 7 d de incubación. Sin embargo, el rendimiento producto/ biomasa en cultivo superficial superó en un 17 % al obtenido en cultivo sumergido. Se estudiaron las condiciones de cultivo sumergido de *A. niger* 110 analizando cómo influyen diferentes medios de cultivo y flujos de aireación en la productividad de ácido cítrico. Los mejores resultados obtenidos fueron con una concentración de sacarosa de 150g/L y 0,25g/L de fosfato con una aireación de 1,3vvm para una concentración de ácido cítrico de 110g/L (Rodríguez, 2015).

1.2.2 Melazas de remolacha

La melaza es un subproducto de las continuas cristalizaciones de las aguas madres en una planta azucarera, es un líquido oscuro y denso compuesto principalmente por agua y sacarosa. Por cada tonelada de remolacha tratada se producen aproximadamente 240 kilogramos de melaza, por lo que resulta un subproducto de gran proporción respecto al producto buscado.

Además de un 50% a 55% de sacarosa, las melazas contienen una gran variedad de nutrientes, lo que las hace ideales como medio de cultivo para multitud de microorganismos como el *Aspergillus niger* (Rivada, 2008).

Subproductos:

Además del producto principal, el ácido cítrico, la planta generará ciertos residuos que pueden llegar a comercializarse y producir beneficio. En primer lugar, el micelio, microorganismo muerto tras la fermentación y que se separa mediante filtración, es muy rico en proteínas y vitaminas por lo que tras ser secado y acondicionado puede venderse como suplemento alimenticio para el ganado (Azúcar, 2000). En segundo lugar, el sulfato cálcico (yeso) formado al diluir el citrato cálcico con ácido sulfúrico, puede ser utilizado como aglomerante en la construcción o como material filtrante en la industria de la alimentación (CABELLO, 2006). Debido al gran volumen de la industria de la construcción en los últimos tiempos es muy probable que se pueda vender este producto en el mercado, si no fuera así habría que gestionarlo como residuo, lo cual sería problemático al producirse en gran volumen.

Por último, el líquido saturado proveniente del cristalizador puede comercializarse como cohesionante en la industria de la alimentación.

El proceso de producción de ácido cítrico anhidro se va a dividir en tres partes claramente diferenciadas: producción del ácido cítrico, separación del ácido cítrico de las impurezas del licor y, por último, purificación y conformado del producto (Rivada, 2008).

1.2.3 Suero Láctico

El suero de leche es un líquido claro, de color amarillo verdoso, resultante de la coagulación de la leche durante la elaboración del queso, contiene en promedio 4,9% de lactosa, 0,9% de proteína, 0,6% de cenizas y 0,3% de grasas, entre otros componentes. Este subproducto se ha convertido en el principal desecho de la industria láctea (Betancourt, 2003). A pesar de los constantes esfuerzos por aprovechar el suero, la mayoría de los volúmenes producidos son vertidos directamente en los cursos de agua naturales provocando un impacto ambiental negativo debido a su elevado contenido de materia orgánica. Una alternativa para su empleo es venderlo a muy bajo precio (0,10\$/L) para ser utilizado como alimento animal (Rodríguez, 2015). Como medio de cultivo, el suero de leche puede suministrar las fuentes de

carbono y de energía necesarias, como lactosa, glucosa y otros azúcares reductores, para el desarrollo de diferentes microorganismos y la producción de metabolitos de alto valor. El número de microorganismos que tienen la capacidad de asimilar la lactosa es limitado, pero al hidrolizar este disacárido y obtener glucosa y galactosa mediante un proceso enzimático empleando lactasa, se amplían significativamente las perspectivas de aprovechamiento del suero en procesos de fermentación, aunque el *A. niger* tiene la capacidad de desdoblar la lactosa y convertirla de inmediato en ácido cítrico sin necesidad de hidrólisis previa. La producción de ácidos orgánicos representa gran interés por cuanto estos metabolitos obtenidos a partir del suero pueden ser utilizados a su vez como aditivos de origen natural en la misma industria láctea. A partir de suero de leche se ha obtenido ácido láctico, acético, propiónico, glucónico, succínico y cítrico (Leal et al., 2005).

Reportes revelan que el suero entero es la mejor opción para la producción de ácido cítrico. Sánchez Toro et al. (2004) realizaron ensayos con cepas de *A. carbonarius* NRRL 368, *A. carbonarius* NRRL 67 y *A. niger* NRRL 3 con diferentes medios de adaptación para la propagación del inóculo. El diseño experimental planteado para evaluar la biosíntesis de ácido cítrico a partir de suero de leche modificado mediante diferentes tratamientos (desproteización, hidrólisis enzimática y evaporación), dio como resultado que las dos cepas de *A. carbonarius* no presentaban diferencias significativas en la formación del ácido, mientras *A. niger* NRRL 3 alcanzó mayores concentraciones cuando se utilizó suero de leche desproteizado, evaporado y con lactosa hidrolizada con β -galactosidasa obteniendo una concentración de 5,77g/L de ácido cítrico.

El efecto de la hidrólisis y la evaporación indiscutiblemente aumenta la concentración de azúcares fermentables, sin embargo, la desproteización del suero no influyó sobre la producción de ácido cítrico por *A. niger*. *A. carbonarius* arrojó concentraciones promedio de ácido cítrico mayores que las encontradas para *A. niger* (9,27g/L y 0,34g/L respectivamente), pero no se presentaron diferencias significativas al variar los tratamientos a los que fue sometido el suero de leche en las fermentaciones realizadas. Leal et al. obtuvo ácido cítrico a partir del suero lácteo entero (Chemistry, 1991) e hidrolizado (SH) por medio de una fermentación sumergida con *Aspergillus niger* 765 y realizaron pruebas para determinar azúcares reductores totales (BALDERRAMA-MARTÍNEZ et al., 2005), biomasa, producción de ácido cítrico, glucosa y pH.

Hubo mayor cantidad de azúcares reductores iniciales en el hidrolizado que en el entero con valores de 46,1 g/L y 23,7 g/L respectivamente, pero al finalizar la fermentación el consumo de azúcares era similar en los dos medios tratados (SE y SH), se presentó disminución de pH de 4,1 a 3,5 y 3,8 debido a la fermentación, y un aumento exponencial de los microorganismos siendo mayor en el hidrolizado

(15,21g/L) por tener disponibilidad de glucosa en el tiempo inicial, en el entero el valor fue de 8,75g/L. La producción de ácido cítrico fue similar en los dos medios 9,9g/L para el suero entero y 9,6g/L para el hidrolizado, lo cual indica que independiente de la hidrólisis de azúcares complejos realizada a uno de los medios (SH), el *Aspergillus niger* tiene la capacidad de producir ácido cítrico desdoblado por sí mismo la lactosa, de esta forma se demuestra que hidrólisis de lactosa solo favorece al crecimiento del microorganismo y no influye significativamente en la producción de ácido.

Para el suero se comparó la hidrólisis ácida y enzimática de la lactosa siendo el uso de enzimas la mejor alternativa ya que no presenta pardeamiento que es un indicio de la formación de subproductos más difíciles de asimilar que la glucosa y la galactosa. En el suero entero (Chemistry), 1991) no se hace necesaria la adición de una fuente de nitrógeno para alcanzar altas producciones de ácido cítrico mientras que en el suero desproteinizado e hidratado (SDH) se deben adicionar 135 ppm de NH_4^+ y sin embargo no se alcanzan tan altas concentraciones de ácido cítrico. Este comportamiento indica que no es conveniente la eliminación de proteínas del suero de leche puesto que este sustrato ofrece los nutrientes necesarios para la fermentación; el SE necesita una adición de una fuente de fósforo, 480 ppm de alcanzando valores de 30 g/L de ácido cítrico en 8 días de fermentación, mientras que el suero de leche desproteinizado e hidrolizado necesita 775 ppm de este mismo ión, el magnesio en concentraciones de 500 y 1000 ppm inhibe la producción de ácido cítrico a partir del SE con *Aspergillus niger*.

Se determinó que la adición de metanol (0,75 % v/v) y de gelatina (4 g/L) incrementaron la producción de ácido cítrico en 1,4 y 1,15 veces respectivamente. Al concluir este artículo se demostró que utilizar el SE como sustrato para la producción de ácido cítrico resulta ser la mejor opción ya que no conlleva ningún tratamiento previo a su utilización como sí ocurre con el SDH, además, el *Aspergillus niger* NRRL 2270 es un buen microorganismo para la producción de ácido cítrico a partir de suero de leche ya que asimila fácilmente la lactosa sin necesidad de una hidrólisis previa (Rodríguez, 2015).

1.2.4 Bagazo de caña de azúcar

El bagazo, residuo lignocelulósico fibroso remanente de los tallos de caña, es obtenido a la salida del último molino del tándem azucarero constituyendo un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscilan entre 1 y 25 mm, presentando una fracción promedio de aproximadamente 20 mm. Desde el punto de vista físico el bagazo está constituido por cuatro fracciones cuyos promedios son:

- Fibra de bagazo 45 %
- Sólidos insolubles 2-3 %
- Sólidos solubles 2-3 %
- Agua 50 %

La conversión del bagazo en derivados puede brindarle a la industria azucarera utilidades de aproximadamente el 30% de la utilidad derivada de la producción de azúcar bajo condiciones normales (Abstengo, 2018).

El proceso de obtención de ácido cítrico a partir de bagazo de caña cuenta con las siguientes etapas:

1. Pretratamiento del bagazo
2. Filtración
3. Fermentación
4. Filtración
5. Separación
6. Cristalización
7. Secado

En primer lugar, tendrán lugar una serie de etapas previas cuyo fin es acondicionar las materias primas principales de la fermentación: el hidrolizado de bagazo. Con el pretratamiento también se logra remover parcialmente la hemicelulosa, disminuir la cristalinidad de la celulosa y en algunas ocasiones, reducir el tamaño de las partículas del material.

- Etapa 1: carga de licor con hemicelulosas
- Etapa 2: Fermentación de hemicelulosas
- Etapa 3: carga de celulosa+lignina (sólido)
- Etapa 4: hidrólisis de celulosa
- Etapa 5: Fermentación de la celulosa

La fermentación va a ser la etapa más duradera de todo el proceso que tiene lugar en la planta. Durante el proceso fermentativo se controlarán distintas variables (temperatura, pH), para que transcurra de manera correcta y se produzca la mayor cantidad posible de ácido cítrico. Será un proceso de tipo discontinuo. El producto obtenido, el licor post-fermentativo, contiene ácido cítrico, agua e impurezas. Este licor se conduce hacia la siguiente etapa del proceso (Guerra, 2018). El caldo de fermentación se clarifica usando un filtro rotativo de vacío. Luego, se usa una serie de unidades de extracción de mezclador-sedimentador para transferir el ácido cítrico de la fase acuosa a la orgánica, en esta etapa ocurre una separación líquido-líquido. La operación se lleva a cabo mediante la extracción en contracorriente del ácido cítrico en una fase acuosa caliente en una segunda serie de unidades mezcladoras-sedimentadoras a 80°C. La extracción posterior produce una solución acuosa purificada de ácido cítrico al 20%. La fase orgánica se enfría y se recicla a los extractores mezcladores-sedimentadores.

Este disolvente es esencialmente inmiscible en agua y tiene una alta eficacia de extracción con respecto al ácido cítrico. La fase orgánica, que contiene el solvente y el ácido cítrico, se envía al paso de extracción posterior. Posteriormente se cristaliza el AC y los cristales salen con una concentración de 88,1%, estos se secan con aire caliente (120°C) para obtener ácido cítrico al 99% y se envasan (Abstengo, 2018).

1.2.5 Otras materias primas

Existen otra gran diversidad de materias primas que pueden ser empleadas en la producción de ácido cítrico y como ejemplo de ello está el plátano Dominico Hartón, empleado en Colombia, que en estado maduro es un fruto rico en carbohidratos. Para la elaboración del sustrato se emplea el fruto sin cáscara y como microorganismo se emplea la cepa de *Aspergillus niger*. Se encontró que el sustrato de plátano Dominico Hartón no es tóxico para el crecimiento del hongo filamentoso *Aspergillus niger* y la producción de ácido cítrico, a pesar de que este medio es un sustrato complejo y no convencional. Se obtuvo la máxima concentración de 13,5 g/L de ácido cítrico, utilizando un pH 5.0 y 150g/L de azúcar reductores, a las 192 horas del proceso fermentativo. Resulta necesario evaluar el crecimiento de *Aspergillus niger* y la producción de ácido cítrico, utilizando sustrato de plátano con concentraciones de azúcares reductores mayores a 150 g/L. También sería de utilidad evaluar en el sustrato de plátano diferentes concentraciones de aditivos utilizados para mejorar el crecimiento de *Aspergillus niger* y la producción de ácido cítrico (Velásquez et al., 2010).

También se tienen referencias del empleo de las vinazas y de la cachaza, aunque en menor medida debido a los bajos rendimientos. Esta se considera una opción favorable debido a que contribuye al aprovechamiento de los residuales de la industria azucarera y la alcoholera (Lugo, 2017). Otra fuente estudiada para la obtención de este ácido han sido las aguas residuales con alto contenido de almidón (Escudé, 2007).

En menor medida se emplean frutos y cítricos, debido a la gran cantidad que se necesita para producir una pequeña parte del ácido cítrico necesario. Como ejemplos se encuentran: el limón, la naranja, la piña y otros que son ricos en este ácido; por ejemplo, en Venezuela se estudió su producción a partir de semeruco (*Malpighia Emarginata*) una fruta autóctona de la región (Liñan and Maldonado, 2013).

1.2.6 Miel final de caña de azúcar

La melaza o miel de caña es un producto líquido y espeso derivado de la caña de azúcar, obtenido del residuo restante en las cubas de extracción de los azúcares. Su aspecto es muy similar al de la miel, aunque de color parduzco muy oscuro, prácticamente negro. El sabor es dulce, con un pequeño regusto amargo (Chaturvedi et al., 2010). Nutricionalmente presenta un altísimo contenido en hidratos de carbono además de vitaminas del grupo B y abundantes minerales, entre los que destacan el hierro, cobre

y magnesio (LÓPEZ et al., 2005, Shami et al., 2015). Su contenido de agua es bajo, los rangos de los principales componentes de las mieles finales, estos datos fueron ilustrados en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Rango de valores normales de los principales componentes de las mieles finales, expresados como g/100g miel final

Componentes	Rango
Sólidos Totales	76-83
Sólidos Disueltos (Brix)	78-85
Sacarosa	30-36
Fructosa	6-10
Glucosa	4-7
Fructosa + Glucosa	11-15
Cenizas Sulfatadas	10-16
Oligosacáridos	1-2
Polisacáridos	2-4
Proteínas y compuestos nitrogenados	2-4,5
Ácidos Orgánicos	2-5

(Rodríguez, 2015)

Estudios de laboratorio que emplearon mieles de caña como sustrato fueron realizados por Majumder et al. empleando cepas mutadas de *A. niger* 14/20 y 79/20 en cultivo sumergido, las melazas de caña tenían un contenido de 20% de agua, 62% de azúcares, 10% de no azúcares y 8% de sales inorgánicas. Para la realización de los experimentos se comparó el empleo de la sal de Prescott, obteniéndose resultados superiores de producción de ácido cítrico en las muestras que no tenían esta sal en su composición. En ausencia de la sal de Prescott la producción de ácido cítrico fue de 7,72mg/mL con el *A. niger* 14/20 y 7,57 mg/mL con el *A. niger* 79/20. Mientras que en presencia de esta sal la cantidad de ácido cítrico producido fue de 4,88 mg/mL con el *A. niger* 14/20 y 4,75 mg/mL con el *A. niger* 79/20 en 13 días de fermentación. Otros autores investigaron con cepas mutadas de *A. niger* siendo la GCBT7 la más productora de ácido cítrico. Los mejores resultados fueron alcanzados con un flujo de oxígeno de 1,0 L/L/min, pH = 6 y temperatura de incubación de 30 °C. Todas las fermentaciones se realizaron durante 144h con 150g/L de melazas crudas. La ferrocianida fue usada para controlar los metales trazas presentes en el medio de melazas. El nitrato de amonio (0,2%) se agregó como la fuente de nitrógeno. La producción máxima de ácido cítrico ($99,56 \pm 3,5$ g/L) se logró por el *Aspergillus niger* GCBT7, la masa celular seca y el consumo de azúcar fueron de 18,5 g/L y 96,55 g/L, respectivamente (Rodríguez, 2015).

1.3 Usos actuales de la miel final como materia prima para diferentes productos

La melaza se emplea principalmente como suplemento energético para la alimentación de animales por su alto contenido de azúcares y su bajo costo en algunas regiones. No obstante, una pequeña porción de la producción se destina al consumo humano, empleándola como edulcorante culinario (Rivada, 2008). En algunos países de Sudamérica esta última suele procesarse artesanalmente hasta transformarla en bloques sólidos de azúcar no refinada muy apreciada por su sabor. Es conocido el uso de melaza en la formación de Briquetas de subproductos que contienen hierro u óxidos de calcio y magnesio, y que son reutilizados en la industria siderúrgica.

También es utilizada para la reconstrucción de la estructura de la piel que soporta el pelo sano. Contiene un alto contenido de calcio y magnesio que ayuda al crecimiento y desarrollo de los huesos, por lo que es empleada para combatir la osteoporosis y otras enfermedades de los huesos. Es además buena sustituta del azúcar para los diabéticos, ya que contiene una carga glicémica moderada (Rodríguez, 2015).

1.4 Situación actual de la industria azucarera y sus derivados

Cuba fue durante muchos años el principal exportador de azúcar del área y contó hasta hace poco con alrededor de 160 ingenios que en las décadas de 70 y 80 del siglo pasado produjeron de forma estable en el entorno de 7 millones de toneladas de azúcar cuyo destino fundamental era la ex Unión Soviética y otros países de la llamada Europa del Este. Este volumen de azúcar producida generaba una cantidad apreciable de bagazo y melaza que podían ser convertidos en derivados como alcohol, proteína unicelular (levadura *Torula*), aglomerados de bagazo, furfural y sus derivados, que también contaban con demanda en estos países y que eran intercambiados por petróleo, alimentos, equipos y materias primas (Guerra, 2018).

La pérdida de mercado y de favorables condiciones de precio que significó la desaparición de la Unión Soviética, la falta de fuentes de crédito y financiamiento, los bajos precios del azúcar característicos de los años 90, el aumento explosivo de los precios del petróleo y el desarrollo de otros sectores de la economía como el turismo como importante fuente de ingresos para el país llevaron a un redimensionamiento del sector azucarero teniendo como objetivos fundamentales la búsqueda de eficiencia económica, la implementación de sistemas de producción sostenibles de bajos insumos de agroquímicos en las tierras más apropiadas para caña y el ahorro máximo de portadores energéticos. La agroindustria azucarera cubana, debido a las transformaciones que se han estado efectuando en la misma desde el año 2002 y que comenzaron con la desactivación de 95 fábricas de azúcar, cuenta actualmente con 56 ingenios. De la caña es posible obtener energía convencional y alimentos, mientras que los

residuales industriales también se logra energía y alimento y al mismo tiempo se evita la degradación del medio ambiente (Abstengo, 2018).

El crecimiento de la producción de derivados de la caña de azúcar, con énfasis en las producciones de alimento animal y de alcoholes de diferentes denominaciones, se incluye dentro de las proyecciones de desarrollo del sector, como parte de las soluciones estratégicas y altamente valoradas para las esferas de la energía, los alimentos y los bioproductos. De la cosecha de la caña y su procesamiento industrial es posible obtener productos y subproductos que constituyen materia prima para la industria transformativa, química y bioquímica que dan lugar a más de medio centenar de productos de valor comercial obtenidos entre todos los países productores de azúcar. Una hectárea de caña es capaz de aportar: 100 t de materia verde cada año, superando en más del doble el rendimiento agrícola a otros cultivos comerciales (Rodríguez, 2015).

Actualmente la industria azucarera cubana tiene como principales objetivos la producción de las diferentes clases de azúcar y el aumento de la producción de derivados. Dentro de los principales derivados producidos actualmente en el país se encuentran el alcohol, aguardiente y otras bebidas alcohólicas, la miel urea bagacillo y el bagazo para la cogeneración de energía.

1.5 Análisis de tecnologías

En la actualidad la producción comercial de ácido cítrico se realiza fundamentalmente por procesos de fermentación en tanques profundos (fermentación sumergida, que es el método más común) o en tanques no profundos (fermentación de superficie), mientras que la fermentación en estado sólido es utilizada en menor medida para la producción de ácido cítrico (Pérez et al., 2016).

- Fermentación sumergida: es la técnica normalmente empleada para la producción de ácido cítrico. Varias son las ventajas de esta técnica, por ejemplo, los altos rendimientos, la elevada productividad y el bajo costo de mano de obra. Existen dos tipos de fermentadores empleados: el fermentador convencional con agitación y el fermentador de columna de aire, aunque el último es el más usado debido a las ventajas que ofrece en el precio, tamaño y funcionamiento. Puede llevarse a batch o en sistemas de fed batch (VANDENBERGHE et al., 1999).
- Fermentación de superficie: Este método requiere menos esfuerzo en el funcionamiento e instalación y los costos de energía son inferiores, aunque es necesaria más mano de obra. A las cámaras de fermentación se les proporciona una circulación de aire eficaz para controlar la temperatura y la humedad, deben estar en condiciones asépticas principalmente durante los primeros dos días cuando las esporas germinan (VANDENBERGHE et al., 1999).

- Fermentación en estado sólido: consiste en el crecimiento de microorganismos sobre partículas sólidas en ausencia de agua libre en el sistema. La extracción de calor metabólico puede convertirse en un problema serio cuando se trabaja a escala de producción, la velocidad de crecimiento de los microorganismos es menor que en la fermentación sumergida y su aplicación se encuentra limitada a microorganismos (fundamentalmente hongos) que pueden desarrollarse en ambientes de baja humedad (MENDOZA and KULICH, 2004).

En el Manual de derivados del ICIDCA se propone la utilización de la miel final como la mejor alternativa para la producción del ácido cítrico partiendo de la fermentación sumergida como proceso de mayor aceptación en los últimos años, con la diferencia de que el número de etapas no sería el óptimo. Al referirse a otros autores como Rivada (2008), la tecnología empleada es más eficiente, obteniéndose un rendimiento de 0,48, pero empleando como materia prima las melazas de remolacha, cuya composición es similar a la miel final de caña de azúcar, pero no sería eficiente su utilización debido a que la remolacha es un alimento de gran importancia y no sería eficiente su utilización como sustrato. Rodríguez (2015), realiza un análisis de tres alternativas de producción diferentes (suero láctico, azúcar y miel final), en el cual considera como la más eficiente la obtención del ácido cítrico a partir del azúcar, pero igualmente esta no sería la más factible, pues si se realizara un estudio de mercado se podría comprobar la alta demanda del azúcar en el país para su consumo y la elaboración de otros productos, además de su exportación; en consecuencia, la mejor y más eficiente alternativa para producir ácido cítrico en Cuba sería partir de las mieles finales de caña de azúcar y llevar un seguimiento de todas las etapas y parámetros necesarios.

1.6 Herramientas de evaluación ambiental

Las herramientas de Producciones más Limpias (P+L) que apoyan las estrategias y sistemas ambientales de las empresas son instrumentos que permiten definir el estado ambiental de un proceso o producto. En la actualidad se dispone de un gran número de herramientas que facilitan el análisis y la gestión ambiental de productos, procesos y/o actividades. Se hace necesario por tanto seguir su clasificación: dependiendo de su función (herramientas de planeación, implementación y control); de la unidad de análisis (la empresa, su entorno, los procesos o los productos); del enfoque del análisis (técnico, ambiental, económico o social) y del tipo de información que genera (cualitativa o cuantitativa)

Entre las herramientas cualitativas se destacan las listas de verificación y las matrices; entre las cuantitativas se encuentran el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y los Eco-indicadores. Otro criterio de clasificación incluye conceptos como Prevención de la Contaminación, Eco-balances, Eco-eficiencia, Eco-diseño, Herramientas Analíticas (ACV, Análisis Costo-Beneficio, Evaluación del Riesgo

Ambiental), Herramientas Procedimentales (Auditoría Ambiental, Estudio de Impacto Ambiental, Sistemas de Manejo Ambiental) y Elementos Técnicos (Modelos de Dispersión de Contaminantes, Análisis de Sensibilidad) (Companioni, 2009).

Las herramientas de análisis cualitativo son en su mayoría empleadas para reemplazar el análisis de los cálculos, típico de las herramientas cuantitativas. En este sentido el análisis cualitativo presenta algunas debilidades. Es evidente la necesidad de utilizar el potencial de las herramientas cualitativas como complemento de las herramientas cuantitativas en la medición de aspectos que estas no contemplan en lugar de querer reemplazarlas, puesto que las cuantitativas permiten realizar comparaciones objetivas de impacto entre diferentes sistemas, considerando todos los flujos de materia y energía consumidos y emitidos durante todo el ciclo de vida (Companioni, 2009).

1.6.1 Análisis del ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental

Un análisis de ciclo de vida (ACV) (Life Cycle Assessment (LCA) en inglés), es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos/desecho) (Smet et al., 1996). El ACV es por tanto una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de un producto y de su proceso de producción, con el fin de evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando (White et al., 1995).

1.6.2 Características del ACV

Las metodologías del ACV se basan en estándares desarrollados por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (Chemistry), 1991) y la Organización Internacional para la Normalización (ISO), conocidas como serie ISO 14 040, en el marco de las normas para la gestión ambiental ISO 14 000. El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante la compilación de un inventario de entradas y salidas del sistema, evaluación de impactos ambientales asociados a las mismas e interpretación de los resultados de las fases de inventario y evaluación de impactos con relación a los objetivos del estudio (Rieradevall, 1999). La técnica utilizada en ACV es la creación de modelos. Se elabora un modelo del complejo sistema utilizado para producir, transportar, usar y eliminar un producto, resultando en un árbol de procesos con todos los aspectos relevantes. Se recopilan todas las entradas y salidas, obteniéndose una larga lista de entradas y salidas, que en muchos casos es difícil de interpretar (Saouter and Feijt, 2000). Durante la evaluación del

impacto, se usa otro modelo para describir la relevancia de entradas y salidas (modelo de mecanismo ambiental). Las aplicaciones más importantes del ACV son: análisis de la contribución de estados de ciclos de vida a la carga ambiental general, con el objetivo de tratar preferentemente los puntos débiles; mejora del producto o proceso, comparación de productos con similar función, comparación de opciones de procesos tecnológicos o manejo de residuos, evaluación de nuevos productos, planeación y evaluaciones estratégicas (Companiononi, 2009).

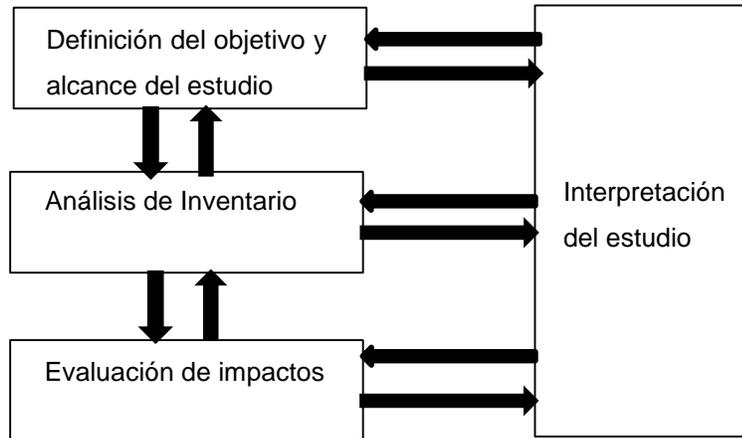


Figura 1.1 Fases de un ACV en un producto en general

En correspondencia con estas fases, hay cuatro estándares ISO especialmente designados para la aplicación del ACV, que en Cuba se corresponden con las NC ISO 14 040- NC ISO 14 043. La definición del objetivo y alcance permite definir el propósito y extensión del estudio, y contiene una descripción del sistema estudiado. Resultan importantes la unidad funcional del producto o servicio entregado y la distribución. ISO recomienda evitar distribuciones, de no ser posible, distribuir el perjuicio ambiental en base a una causalidad física o una base socioeconómica (2000, Vink and colaboradores, 2003).

1.6.3 Casos de ACV

En Cuba se han realizado algunas contribuciones al desarrollo de esta herramienta (Llanes and colaboradores, 2005), este estudio sólo se ha enfocado al aspecto energético y considerando tres categorías de impacto (Calentamiento Global, Acidificación, Formación de partículas en suspensión). Rodríguez (2002b) aplica el ACV para obtener una estrategia de mejoras ambientales, usando el Eco-indicador 95.

Contreras (2009) realiza un estudio comparativo del uso de los subproductos de la cana de azúcar en Cuba, demostrando la ventaja ambiental de la valorización de residuos y subproductos de esta industria. Pérez (2009), realiza la evaluación de impacto mediante análisis de ciclo de vida en la empresa azucarera Panchito Gómez Toro de la provincia Villa Clara, donde se evidencian los beneficios ambientales por la

alta eficiencia energética en esta empresa. No obstante, en este sector se requiere continuar trabajando para lograr obtener la evaluación en las restantes empresas del país (Companiononi, 2009).

Conclusiones Parciales:

1. El ácido cítrico constituye uno de los ácidos más importantes en la actualidad a nivel mundial.
2. Existe una gran variedad de materias primas que pueden ser empleadas como sustrato en la producción de ácido cítrico.
3. La miel final de caña de azúcar es la alternativa más factible para la producción del ácido cítrico.
4. El ACV constituye una de las herramientas más empleadas en la evaluación del impacto ambiental de los productos y procesos ya que proporciona la posibilidad de establecer las prioridades para definir estrategias preventivas para el mejoramiento del medio ambiente.

Capítulo II: Cuantificación de los flujos del proceso

En este capítulo se cuantifican los flujos de entrada y salida a cada etapa del proceso de producción de ácido cítrico a partir de miel final de caña de azúcar. La producción será realizada a partir de la integración de la planta a la UEB Uruguay para la utilización de las tecnologías y servicios auxiliares de la misma. Para la cuantificación de los flujos del proceso se aplicaron los balances de masa y energía que caracterizan a los modelos fenomenológicos del proceso.

2.1 Justificación de la propuesta

Atendiendo a la disponibilidad de la materia prima, la localización geográfica de la UEB Uruguay y al potencial energético de esta industria, se propone la ubicación de la planta en la provincia de Sancti Spíritus, específicamente en el municipio de Jatibonico como se señala en el Anexo 4. Actualmente esta industria azucarera posee la mayor capacidad molienda (9 200 t/d) de Cuba, es por ello que se considera como la principal alternativa para la propuesta de la planta de producción de ácido cítrico (López, 2005).

2.2 Descripción del proceso de producción de la UEB Uruguay

La UEB Uruguay, se localiza al sureste de la provincia de Sancti Spíritus, en el municipio de Jatibonico; es en la actualidad uno de los mayores centrales del país, aportando más del 70% de la producción azucarera del territorio espirituario (González, 2015). Las etapas que conforman el proceso de producción de azúcar crudo en la UEB se describen a continuación.

Preparación y molienda: La caña se prepara antes de pasarla por los molinos. Las desmenuzadoras extraen entre 40 y 60 % del jugo y en la etapa final de molienda se termina la extracción auxiliada por el agua de imbibición (25 a 30 % de la caña), que sustentada por el fenómeno de difusión coopera con el agotamiento, para que el bagazo tenga poco remanente de azúcar. En esta etapa existen dos corrientes de salida, la principal el jugo mezclado y una secundaria, el bagazo.

Purificación: El jugo mezclado posee además del azúcar y el agua algunas impurezas que deben ser eliminadas para que el producto final tenga la calidad requerida: azúcares reductores, albúmina, gomas, pectinas, ácidos orgánicos e inorgánicos, sales y otros compuestos disueltos o en suspensión. La base de la purificación es el método cal-calor (hidróxido de calcio (cal) y alta temperatura), lo que se consigue por diversas vías. El P_2O_5 (equivalente de ácido fosfórico) y otros ácidos reaccionan con la cal y forman flóculos que arrastran las impurezas en una secuencia de operaciones y procesos unitarios donde se destacan la Alcalización (mezcla y reacción entre los compuestos del jugo y cal), Calentamiento, Sedimentación y Filtración. El producto principal de esta etapa es el jugo claro y además sale un

subproducto de gran interés en otras producciones, como lo es la cachaza, que contiene, principalmente, las impurezas separadas y es una vía para la pérdida de sacarosa.

Concentración: El jugo claro se concentra por evaporación en el múltiple efecto, eliminándose la mayor parte del agua contenida. El múltiple efecto está compuesto por una serie de evaporadores de forma tal que el vapor extraído en un vaso sirve como medio de calentamiento al vaso que sigue. Como producto final se obtiene la meladura, que es una solución azucarada de alta pureza y con aproximadamente 60 % de sólidos solubles.

Cristalización: La meladura se continúa concentrando en la primera etapa de trabajo de los tachos. La segunda etapa del funcionamiento consiste en la cristalización de la sacarosa. La cristalización en los tachos no es espontánea, sino que se logra con un grano de base (pie de semilla) el que “engorda” por un fenómeno de difusión. La extracción de sacarosa se termina en los cristalizadores donde la difusión se incrementa con agitación lenta y enfriamiento de la masa cocida extraída de los tachos.

Purgado: En las centrífugas se alimentan las distintas masas cocidas y se separa el grano de las mieles. El azúcar comercial es generalmente una mezcla de las extraídas en las centrífugas de primera y segunda, el azúcar de tercera se utiliza como pie de semilla para la producción del producto final. Las mieles separadas aún contienen cantidades considerables de sacarosa y se pueden usar como base para la extracción. La miel que ya está agotada (aunque contiene aún gran cantidad de sacarosa) se considera miel final y es un subproducto del proceso, el cual será considerado como la materia prima para la producción del ácido cítrico (Marín, 2017).

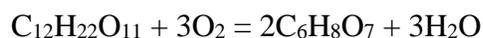
azucarada obtenida de la etapa anterior iría a la primera etapa de filtración, a la cual entra agua de lavado para los filtros rotatorios al vacío. La disolución azucarada filtrada sale con una temperatura igual a 30 °C y entra a la etapa de calentamiento durante 3 minutos donde se le administra vapor vegetal proveniente de los pre evaporadores. De esta etapa sale la disolución azucarada filtrada calentada a una temperatura de 105 °C la que es enviada a los tanques de almacenamiento hasta que alcance la temperatura requerida ($T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A la etapa de enfriamiento entra la disolución procedente de los tanques de almacenamiento, donde se utiliza agua a temperatura ambiente ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) para enfriar la disolución hasta una temperatura de 40 °C que será enviada a la etapa de fermentación.

La carga del fermentador se completa con la adición de ciertos nutrientes suplementarios (KH_2PO_4 , NH_4Cl , MgSO_4 , $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ y ZnSO_4). Luego comenzará a circular agua por la chaqueta y el sistema de agitación del fermentador entrará en funcionamiento, todo ello encaminado a disminuir la temperatura del medio hasta la temperatura idónea de fermentación. Una vez alcanzada la temperatura de fermentación, se introduce el inóculo (Rivada, 2008).

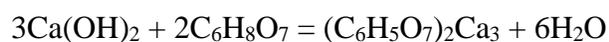
Luego de producida la inoculación, el microorganismo comenzará a crecer en el medio, consumiendo la sacarosa y fabricando ácido cítrico. El medio fermentativo estará agitado y aireado. En esta fase, el sistema de refrigeración del fermentador deberá estar en marcha ya que el proceso es exotérmico y se debe mantener la temperatura idónea.

La fermentación va a ser la etapa más duradera de todo el proceso con una duración de siete días. Será un proceso de tipo discontinuo. El producto obtenido, el fermentado, contiene ácido cítrico, agua y una serie de impurezas.



La etapa de separación comienza con la llegada del fermentado al filtro rotatorio a vacío, cuya función es separar el micelio (microorganismo muerto). La torta sólida que forma el micelio será enviada hacia un depósito donde será almacenada. El líquido filtrado, compuesto por el fermentado sin micelio, se transporta hacia la etapa de precipitación.

La reacción de precipitación se realizará en discontinuo a una temperatura de 50 °C. Una vez acabado el proceso de lechada, la masa dentro del reactor se calienta hasta una temperatura cercana a la de ebullición.



Calentado el licor, será enviado por tubería hacia un nuevo filtro de tambor rotatorio al vacío. El líquido filtrado (licor post-fermentativo sin ácido cítrico) es mandado hacia un depósito para su almacenaje. En el reactor de craqueo, la torta de citrato cálcico se irá mezclando con

una disolución de ácido sulfúrico, produciéndose una reacción química que forma yeso (el cual es sólido y precipita) y deja libre en disolución el ácido cítrico.



Tras el craqueo del citrato cálcico, la masa reaccionante se conduce mediante tubería a un filtro de banda de vacío que separará el sulfato cálcico o yeso del líquido que contiene el ácido cítrico. El yeso se transporta hacia un depósito para su almacenaje, mientras que el líquido filtrado será conducido hasta un sistema combinado de desmineralización y carbón activado que eliminará ciertas impurezas que aún arrastra el producto.

La fase de purificación comienza cuando la disolución de ácido cítrico abandona la columna de intercambio iónico y carbón activado y es conducida hacia el siguiente equipo, que es un evaporador de doble efecto de película descendente. En este proceso la disolución de ácido cítrico perderá agua mediante la acción de un calor cedido por un vapor condensante, quedando lo suficientemente concentrada como para poder entrar en el siguiente proceso.

La corriente que sale del evaporador se introduce en un equipo de cristalización. En el interior del aparato se creará sobresaturación por vacío, lo que provocará la nucleación y la formación de cristales sólidos de ácido cítrico. Estos cristales, acompañados por el resto del licor que no ha cristalizado, abandonarán el cristizador camino de la siguiente etapa.

El magma será conducido hasta una centrífuga continua de canasta que separará los cristales recién formados de producto del licor y sus impurezas, abandonando el equipo prácticamente seco. La corriente cristalina es conducida a un secador de lecho fluidizado donde los cristales de ácido cítrico pierden el agua restante, quedando totalmente secos. En esta etapa se le darán las características finales al producto (Rivada, 2008).

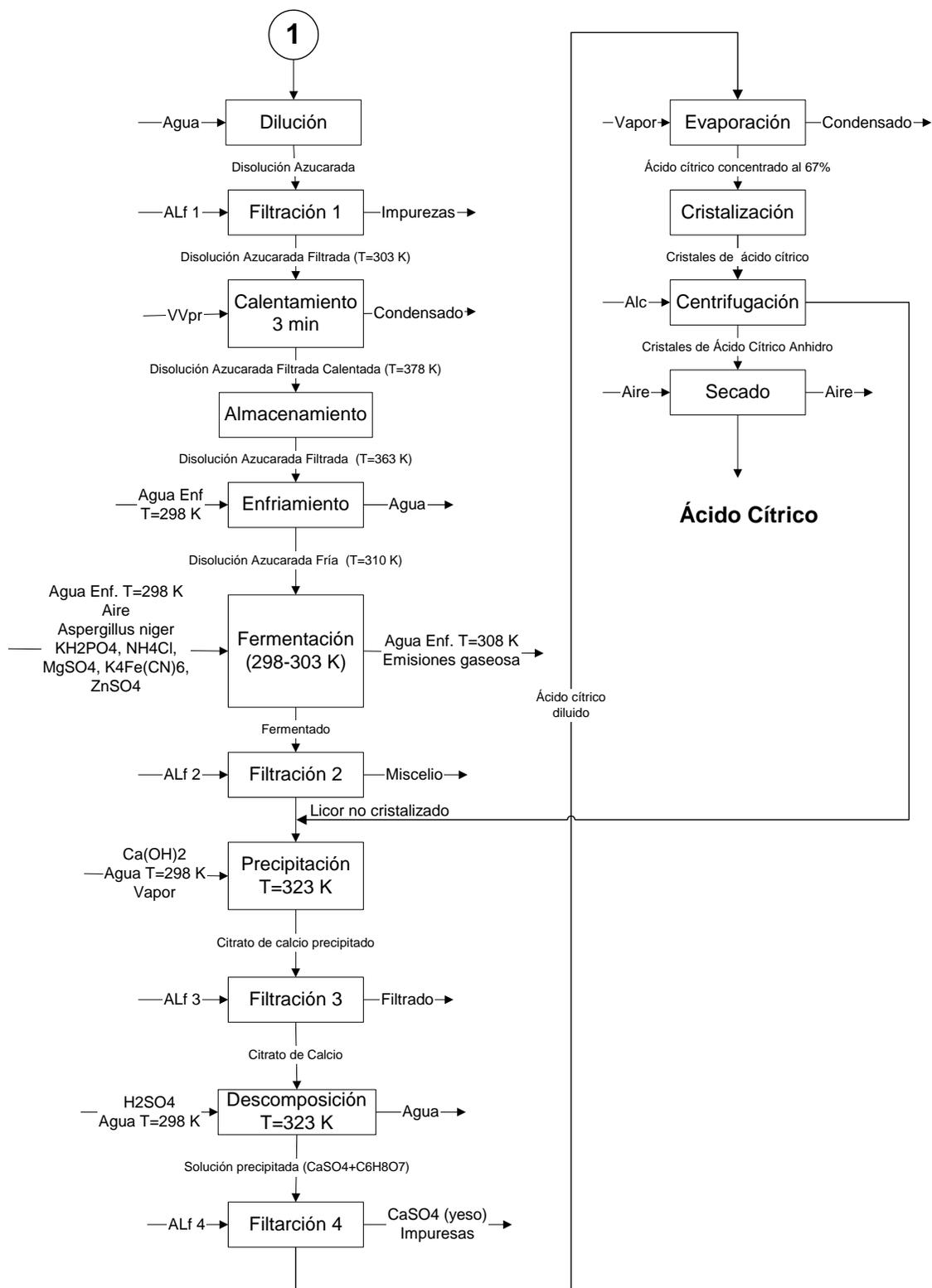


Figura 2.2 Diagrama de bloques del proceso de producción de ácido cítrico a partir de miel

2.4 Cuantificación de los flujos del proceso

Aplicando los balances de masa y energía que caracterizan a los modelos fenomenológicos del proceso de producción de ácido cítrico a partir de miel final de caña de azúcar se cuantificaron las corrientes que intervienen en el mismo por cada ciclo de trabajo (c), donde cada ciclo tiene una duración de 7 días. Cada una de las etapas fue desglosada y en las tablas de la 2.1 a la 2.15 se muestran los resultados de los balances, así como las suposiciones realizadas.

Etapas 1: Dilución de la miel

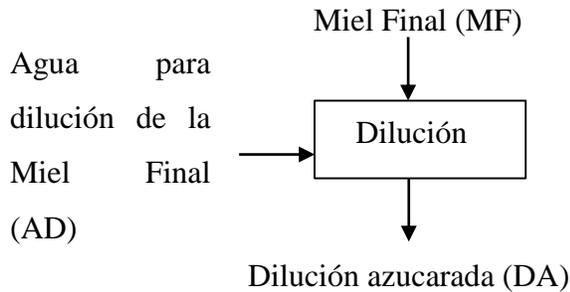


Figura 2.3 Etapa de Dilución

Modelos empleados:

$$DA = MF * SMF/20$$

$$AD = DA - MF$$

La miel final fue calculada a partir de los balances que fueron realizados en la UEB Uruguay (Anexo 3) y se determinó que la misma (MF) no cubría las demandas para el proceso de producción, por tanto, se calculada la necesaria para satisfacer las cantidades requeridas de materia prima de la planta de ácido cítrico.

Tabla 2.1 Resultados de los balances etapa de Dilución

ID	Unidad	Valor	Supuesto
MF	kg/c	7,94E+05	Para suplir las necesidades de materia prima es necesario comprar 7,02E+06 kg/a de MF
AD	kg/c	3,46E+05	
DA	kg/c	4,48E+05	Se debe diluir la miel hasta que su concentración baje a 20% de sacarosa (Rivada, 2008)

Etapa 2: Filtración 1

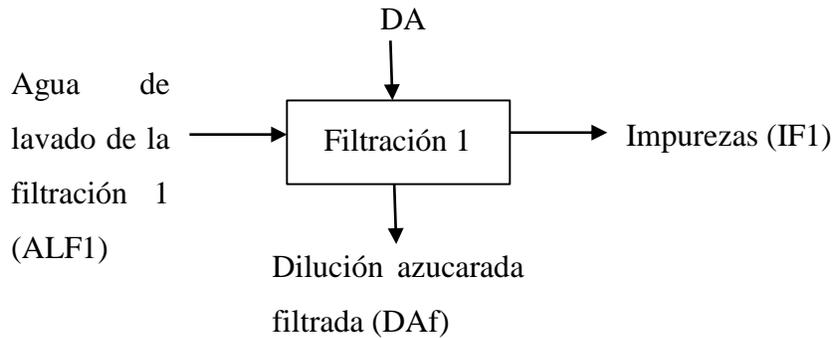


Figura 2.4 Etapa de Filtración 1

Modelos empleados:

$$ALF1 = 0,04 * DA$$

$$IF1 = 0.10 * DA$$

$$DAf = DA + ALF1 - IF1$$

Tabla 2.2 Resultados de los balances etapa de Filtración 1

ID	Unidad	Valor	Supuesto
ALF1	kg/c	3,18E+04	4%*DA (Rivada, 2008)
IF1	kg/c	7,94E+04	10%*DA (Rivada, 2008)
DAf	kg/c	7,47E+04	

Etapa 3. Calentamiento

Consumo de Vapor Vegetal procedente del pre-evaporador de la UEB para esterilización de la disolución azucarada filtrada (VcDAf)

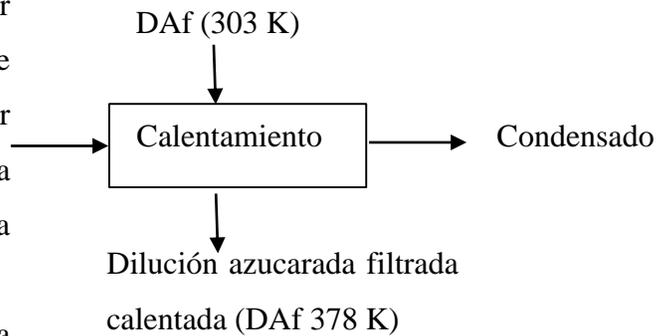


Figura 2.5 Etapa de Calentamiento

Modelos empleados:

$$CpDAf = 2,92 - 4,31E - 02 * BxDAf + 6,7E - 05 * BxDAf * TDAfe + 6,93E - 03 * TDAfe - 9,27E - 06 * TDAfe^2$$

$$VcDAf = DAf * CpDAf * (TDAfs - TDAfe)/hpr$$

Tabla 2.3 Resultados de los balances etapa de Calentamiento

ID	Unidad	Valor	Supuesto
VcDAf	kg/c	8,10E+04	

Etapa 4. Almacenamiento

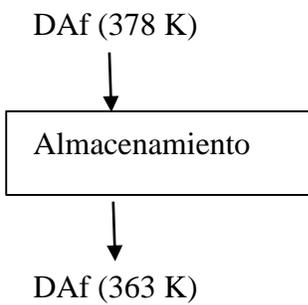


Figura 2.6 Etapa de Almacenamiento

Etapa 5. Enfriamiento

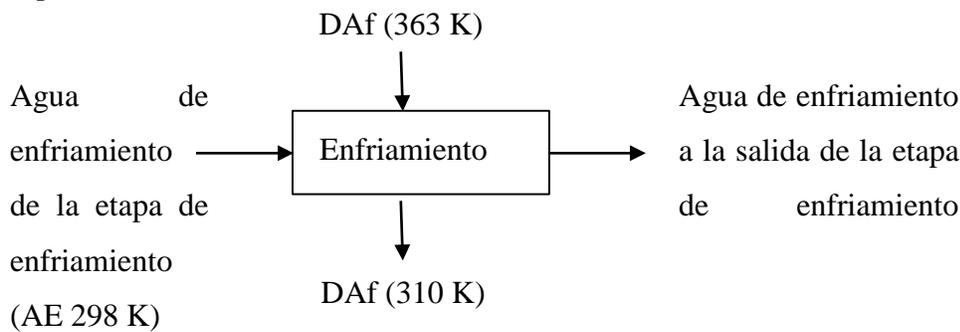


Figura 2.7 Etapa de Enfriamiento

Modelos empleados:

$$CpDAfE = 2,92 - 4,31E - 02 * BxDAf + 6,7E - 05 * BxDAf * TDAfsCA + 6,93E - 03 * TDAfsCA - 9,27E - 06 * TDAfsCA^2$$

$$AE = DAf * CpDAfE * (TDAfsE - TDAfsCA)/(4.19 * (TAEe - TAEs))$$

Tabla 2.5 Resultados de los balances etapa de Enfriamiento

ID	Unidad	Valor	Supuesto
AE	kg/c	1,3.4E+06	

Etapa 6. Fermentación

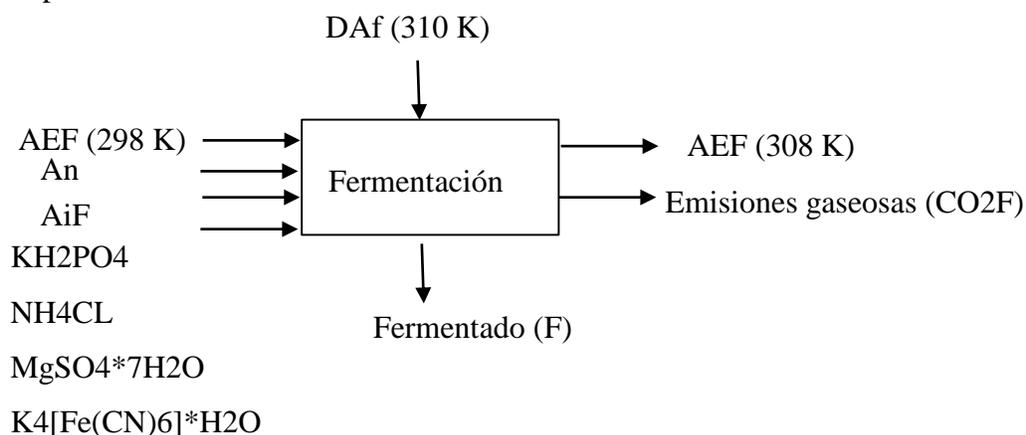


Figura 2.8 Etapa de Fermentación

Leyenda:

AEF: Agua de enfriamiento consumida en el fermentador para mantener la temperatura

An: *Aspergillus niger*

AiF: Aire requerido en la fermentación

C_{pDAfE} : Calor específico de la Disolución Azucarada filtrada a la entrada del Fermentador (kJ/kgK)

d_{DAf} : Densidad de la Disolución Azucarada filtrada (kg/m^3)

$c_m(SDAf)$: Concentración másica de Sacarosa en la Disolución Azucarada filtrada que entra al fermentador ($\text{kg/m}^3 \text{ c}$)

$c(SDAf)$: Concentración molar de Sacarosa en la Disolución Azucarada filtrada que entra al fermentador ($\text{mol/m}^3 \text{ c}$)

SDAf: Sacarosa en la Disolución Azucarada filtrada que entra al fermentador (kg/c)

$c(\text{AcCF})$: Concentración molar de Ácido cítrico en el fermentador ($\text{mol/m}^3 \text{ c}$)

$c_m(\text{AcCF})$: Concentración másica de Ácido cítrico en el fermentador ($\text{kg/m}^3 \text{ c}$)

AcCF: Ácido cítrico en la fermentación (kg/c)

$n(SDAf)$: Cantidad de sustancia (mol) de la sacarosa (mol/c)

$n(\text{O}_2\text{F})$: Cantidad de sustancia (mol) de oxígeno requerido en la fermentación (mol/c)

O_2F : Oxígeno requerido en la fermentación (kg/c)

CO_2F : Dióxido de carbono producido en la fermentación (kg/c)

NT: Nutrientes totales alimentados al fermentador (kg/c)

AF: Agua en el fermentado (kg/c)

NF: Nutrientes en el fermentado (kg/c)

SF: Sacarosa que queda sin reaccionar en la fermentación (kg/c)

F: Fermentado (kg/c)

Modelos empleados:

$$CpDAfE = 2,92 - 4,31E - 02 * BxDaf + 6,7E - 05 * BxDaf * TDAfsE + 6,93E - 03 * TDAfsE - 9,27E - 06 * TDAfsE^2$$

$$AEF = DAf * CpDAfF * (TDAFsE - TF)/(4,19 * (TAEFs - TAEFe))$$

$$dDAf = 1000 * (1 + (BxDaf * (BxDaf + 200)/54000)) * (1 - (0,036 * (TDAFsE - 293)/(433 - TDAFsE)))$$

$$KH2PO4 = 0,0015 * DAf$$

$$NH4Cl = 1,25E - 02 * DAf$$

$$MgSO_4 * 7H_2O = 2E - 04 * DAf$$

$$K4[Fe(CN)6] * H2O = 5E - 03 * DAf$$

$$ZnSO4 = 1,5E - 03 * DAf$$

$$An = 1E - 03 * DAf$$

$$V(DAf) = DAf/dDAf$$

$$cm(SDAf) = 0.20 * dDAf$$

$$c(SDAf) = SDAf/0.342$$

$$SDAf = cm(SDAf) * V(DAf)$$

$$c(AcCF) = 1.48 * c(SDAf)$$

$$cm(AcCF) = 0,19212 * c(AcCF)$$

$$AcCF = cm(AcCF) * V(DAf)$$

$$n(SDAf) = SDAf/0.342$$

$$n(O2F) = 3 * n(SDAf)$$

$$O2F = 3.2E - 02 * n(O2F)$$

$$AiF = 5.71 * O2F$$

$$V(AiF) = 0,84 * AiF$$

$$CO2F = 0,106 * n(SDAf)$$

$$NT = KH2PO4 + NH4Cl + Mg SO_4 \cdot 7H_2O + K4[Fe(CN)6] \cdot H2O + ZnSO4$$

$$AF = DAf - SDAf$$

$$NF = 0.10 * NT$$

$$SF = 0.02 * SDAf$$

$$F = 1.2 * (AF + NF + SF + AcCF)$$

Tabla 2.6 Resultados de los balances etapa de Fermentación

ID	Unidad	Valor	Supuesto
CpDAfE	kJ/kgK	3,04	
AEF	kg/c	3,79E+05	
dDAf	kg/m ³	1,23E+03	(Peacock, 1995)
KH ₂ PO ₄	kg/c	1,12E+03	(Azúcar, 2000)
NH ₄ Cl	kg/c	9,33E+03	(Azúcar, 2000)
MgSO ₄ *7H ₂ O	kg/c	1,49E+02	(Azúcar, 2000)
K ₄ [Fe(CN) ₆]	* kg/c	3,73E+03	(Azúcar, 2000)
H ₂ O			
ZnSO ₄	kg/c	1,12E+03	(Azúcar, 2000)
An	kg/c	7,47E+02	(Azúcar, 2000)
V(DAf)	m ³ /c	6,07E+02	Se debe diluir la miel hasta que su concentración baje a 20% de sacarosa
cm(SDAf)	kg/m ³ .c	2,46E+02	Factor 0,2 significa 20% sacarosa en el sustrato (Disolución azucarada filtrada), valor reportado en la literatura (Azúcar, 2000, Rodríguez, 2015, Pérez et al., 2016)
c(SDAf)	mol/m ³ .c	7,19E+02	Masa Molecular sacarosa = 0,342 kg/mol (Rodríguez, 2015)
SDAf	kg/c	1,49E+05	
c(AcCF)	mol/m ³ .c	1,06E+03	Estequiométricamente, por cada mol de sacarosa, se obtendría 2 moles de ácido cítrico, partiendo de una concentración de c(SDAf) se obtendría la concentración de ácido cítrico teórico, pero se reporta en literatura (Rivada, 2008) un 74% de rendimiento en esta etapa
cm(AcCF)	kg/m ³ .c	2,05E+02	M (Ác. Cítrico) = 192,12 g/mol = 0,19212 kg/mol

AcCF	kg/c	1,24E+05	
n(SDAf)	mol/c	4,37E+05	Masa Molecular sacarosa = 0,342 kg/mol (Rodríguez, 2015)
n(O2F)	mol/c	1,31E+06	1 mol de sacarosa requiere 3 mol de dioxígeno, según la estequiometría de la reacción
O2F	kg/c	4,19E+04	M(O2) = 32 g/mol Se convierte de g a kg dividiendo por E+03
AiF	kg/c	2,39E+05	Aire hay 21% de O2 (0,21) Se considera un exceso de aire de 20%, por tanto $(1,2/0,21) = 5,71$ (Rivada, 2008)
V(AiF)	m ³ /c	2,01E+05	d(aire seco) a 25 °C = 1,189 kg/m ³ $(1/1,189) = 0,84$
CO2F	kg/c	4,63E+04	2,41 mol CO2/mol Sacarosa (Rivada, 2008) M(CO2) =44 g/mol = 0,044 kg/mol $2,41 * 0,044 = 0,106$
NT	kg/c	1,55E+04	
AF	kg/c	5,97E+05	
NF	kg/c	1,55E+03	10% Nutrientes totales (Rivada, 2008)
SF	kg/c	2,99E+03	2 % Sacarosa que tiene el sustrato (disolución azucarada filtrada) (Rivada, 2008)
F	kg/c	8,71E+05	

Etapa 7. Filtración 2

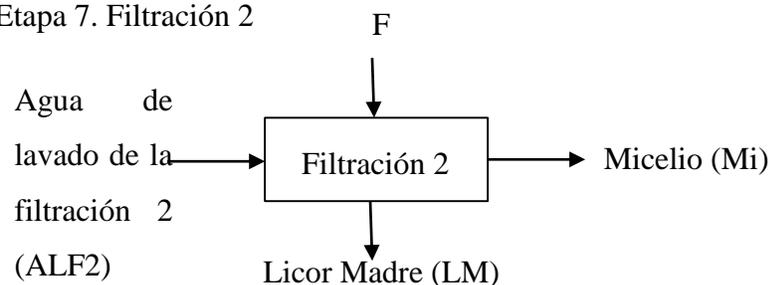


Figura 2.9 Etapa de Filtración 2

Modelos empleados:

$$Mi = 0,02 * F$$

$$ALF2 = 0.05 * F$$

$$LM = F + ALF2 - Mi$$

Tabla 2.7 Resultados de los balances etapa de Filtración 2

ID	Unidad	Valor	Supuesto
ALF2	kg/c	4,36E+04	5%F (Rivada, 2008)
Mi	kg/c	1,74E+04	2%F (Rivada, 2008)
LM	kg/c	8,79E+05	84% de recuperación

Etapa 8. Precipitación

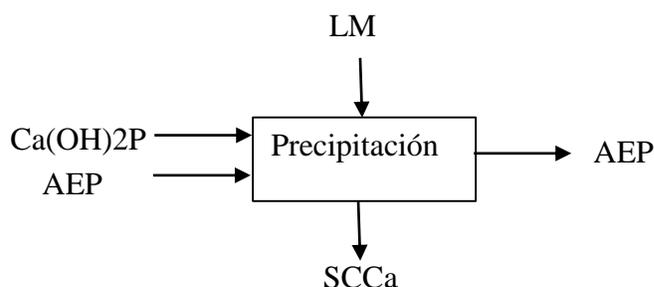


Figura 2.10 Etapa de Precipitación

Leyenda:

Ca(OH)2P: Lechada de cal para la precipitación del citrato de calcio (kg/c)

AEP: Agua de enfriamiento del reactor de precipitación

SCCa: Suspensión de citrato de calcio

ACa(OH)2P: Agua para preparar la lechada de cal (kg/c)

CCa: Citrato de calcio en la suspensión de Citrato de calcio (kg/c)

AgCCaP: Agua en Citrato de calcio precipitado (kg/c)

CCaP: Citrato de calcio precipitado (kg/c)

BxF: Sólidos disueltos totales en el fermento (%)

CpF: calor específico del fermentado (kJ/kgK)

Modelos empleados:

$$Ca(OH)2P = 0.61 * AcCF$$

$$ACa(OH)2P = 0.67 * Ca(OH)2P$$

$$CCa = 1.3 * AcCF$$

$$AgCCaP = 0,30 * CCaP$$

$$CCaP = 1,43 * CCaPr$$

$$SCCa = 3,45 * CCaP$$

$$BxF = ((NF + SF + AF)/F) * 100$$

$$CpF = 2,92 - 4,31E - 02 * BxF + 6,7E - 05 * BxF * TF + 6,93E - 03 * TF - 9,27E - 06 * TF^2$$

$$AEP = (LM * CpF * (TSCCa - TLM))/(4,19 * (TAEPs - TAEPe))$$

Tabla 2.8 Resultados de los balances etapa de Precipitación

ID	Unidad	Valor	Supuesto
Ca(OH)2P	kg/c	2,9E+04	0,58 kg Ca(OH)2/kg Ácido cítrico (Rivada, 2008) Se considera un 5% en exceso para tener un exceso de cal ya que ésta vendrá generalmente con impurezas
ACa(OH)2P	kg/c	1,95E+04	
CCa	kg/c	6,19E+04	A partir de la estequiometría y empleando las relaciones de masa reactante (ácido cítrico) /producto (Citrato de calcio) estequiométrico = masa reactante (ácido cítrico) /producto (Citrato de calcio) teórico se obtiene la masa de citrato de calcio teórica. La ley de las proporciones constantes o ley de las proporciones definidas (Ley de Proust) El rendimiento de la reacción estará en torno al 95%, pero se supondrá que es de un 100% para así sobredimensionar las unidades posteriores (Rivada, 2008) se obtiene el citrato de calcio a obtener en la etapa $M(AcC) = 192,12 \text{ g/mol} = 0,19212 \text{ kg/mol}$ $M(CCa) = 498,46 \text{ g/mol} = 0,49846 \text{ kg/mol}$
AgCCaP	kg/c	2,57E+04	Se considera un 30% de Humedad

CCaP	kg/c	8,58E+04	Se considera en la Filtración un 97% de rendimiento y que contiene 30% H ₂ O
BxF	%	6,91E+01	
CpF	kJ/kgK	2,59	
AEP	kg/c	5,32E+05	CpH ₂ O=4,19 kJ/kgK (PAVLOV, 1981)
SCCa	kg/c	2,96E+05	A partir de la estequiometría y empleando las relaciones de masa reactante (ácido cítrico) /producto (Citrato de calcio) estequiométrico = masa reactante (ácido cítrico) /producto (Citrato de calcio) teórico se obtiene la masa de citrato de calcio teórica, considerando 65% de rendimiento en la precipitación (Rivada, 2008) se obtiene el citrato de calcio a obtener en la etapa M(AcC) = 192,12 g/mol = 0,19212 kg/mol M(CCa) =498,46 g/mol = 0,49846 kg/mol

Etapa 9. Filtración 3

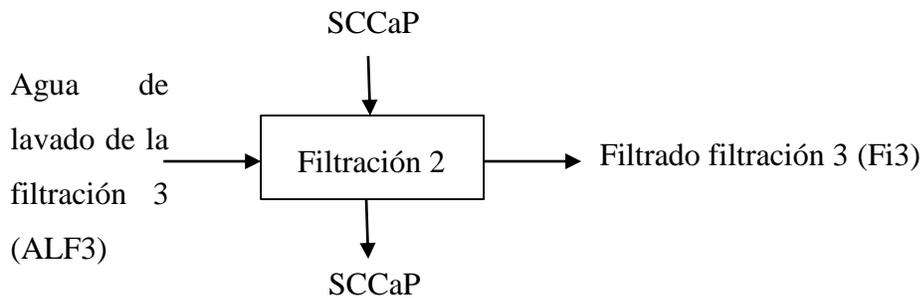


Figura 2.11 Etapa de Filtración 3

Modelos empleados:

$$ALF3 = 8,5E - 02 * SCCa$$

$$Fi3 = 0.8 * SCCa$$

Tabla 2.9 Resultados de los balances etapa de Filtración 3

ID	Unidad	Valor	Supuesto
ALF3	kg/c	2,52E+04	Se considera el 8,5%SCCa (Rivada, 2008)
Fi3	kg/c	2,37E+05	

Etapa 10. Descomposición

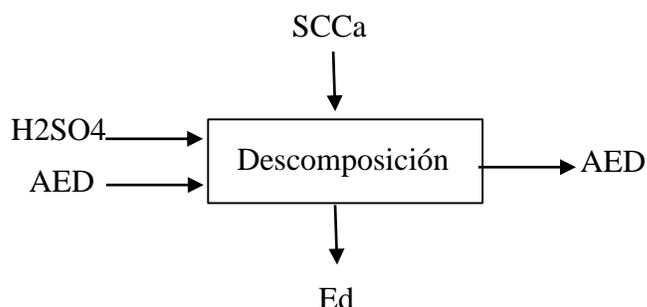


Figura 2.12 Etapa de Descomposición

Leyenda:

H2SO4: Ácido sulfúrico empleado en la descomposición (kg/c)

AcCD: Ácido cítrico obtenido en la descomposición (kg/c)

CaSO4: Sulfato de calcio obtenido en la descomposición (kg/c)

AgH2SO4: Agua en ácido sulfúrico diluido (kg/c)

H2SO4ex: Ácido sulfúrico en exceso incluido en el efluente de la descomposición (kg/c)

CCaPrs: Citrato de calcio precipitado sin reaccionar (kg/c)

Ed: Efluente de la descomposición (kg/c)

AED: Agua enfriamiento para la chaqueta del reactor de descomposición (kg/c)

Modelos empleados:

$$H2SO4 = 0,10 * n(H2SO4)$$

$$AcCD = 0,77 * CCaPr$$

$$CaSO4 = 0,82 * CCaPr$$

$$AgH2SO4 = 0,9 * H2SO4$$

$$H2SO4ex = 0,01 * H2SO4$$

$$CCaPrs = 0,01 * CCaPr$$

$$Ed = AgCCaP + AgH2SO4 + H2SO4ex + AcCD + CaSO4 + CCaPrs$$

Tabla 2.10 Resultados de los balances etapa de Descomposición

ID	Unidad	Valor	Supuesto
H2SO4	kg/c	3,6E+04	<p>$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98,08 \text{ g/mol} = 0,09808 \text{ kg/mol}$</p> <p>$m = n \cdot M$</p> <p>Se considera un 5% en exceso de H2SO4 para tener la seguridad de que todo el citrato se transforma (Rivada, 2008)</p>
AcCD	kg/c	4,62E+04	<p>A partir de la estequiometría y empleando las relaciones de masa reactante (CCa)/producto (ácido cítrico) estequiométrico = masa reactante (CCa)/producto (ácido cítrico) teórico se obtiene la masa de citrato de calcio teórica, considerando 100% de conversión en la descomposición (Rivada, 2008) se obtiene el ácido cítrico a obtener en la etapa</p> <p>Ley de las proporciones constantes, proporciones definidas o de Proust</p> <p>$M(\text{AcC}) = 192,12 \text{ g/mol} = 0,19212 \text{ kg/mol}$</p> <p>$M(\text{CCa}) = 498,46 \text{ g/mol} = 0,49846 \text{ kg/mol}$</p>
CaSO4	kg/c	4,92E+04	<p>A partir de la estequiometría y empleando las relaciones de masa reactante (CCa)/producto (sulfato de calcio) estequiométrico = masa reactante (CCa)/producto (sulfato de calcio) teórico se obtiene la masa de citrato de calcio teórica, considerando 100% de conversión en la descomposición (Rivada, 2008) se obtiene el ácido cítrico a obtener en la etapa</p> <p>$M(\text{CaSO}_4) = 136,14 \text{ g/mol} = 0,13614 \text{ kg/mol}$</p> <p>$M(\text{CCa}) = 498,46 \text{ g/mol} = 0,49846 \text{ kg/mol}$</p>
AgH2SO4	kg/c	3,24E+04	<p>El ácido sulfúrico provendrá de una disolución al 10% en peso (Rivada, 2008)</p>

H2SO4ex	kg/c	3,60E+02	Como se determinó el consumo de ácido sulfúrico con un exceso del 5% se considera que el exceso de ácido sulfúrico que quedó sin reaccionar (5%-4% = 1%)
CCaprs	kg/c	6,00E+02	Se considera 1% sin reaccionar a la salida de la descomposición (Rivada, 2008)
Ed	kg/c	1,55E+05	A la salida de la descomposición hay el agua que tiene el citrato de calcio a reaccionar, el agua que entra con el ácido sulfúrico, un exceso de ácido sulfúrico que quedó sin reaccionar (5%-4% = 1%), el ácido cítrico obtenido, sulfato de calcio
AED	kg/c	1,34E+04	CpCCaP= 0,653 kJ/kgK CpH2O=4,19 kJ/kgK (PAVLOV, 1981)

Etapa 11. Filtración 4

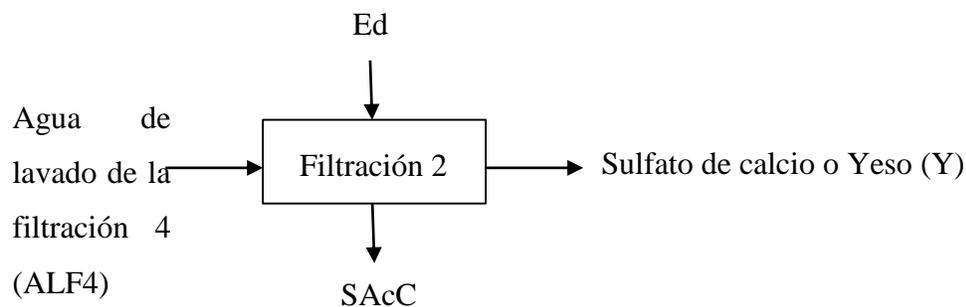


Figura 2.13 Etapa de Filtración 4

Modelos empleados:

$$ALF4 = 0,04 * Ed$$

$$AcCY = 0.01 * AcCD$$

$$Y = 1.01 * (CaSO4 + AcCY + H2SO4ex)$$

$$SAcC = Ed + ALF4 - Y$$

Tabla 2.11 Resultados de los balances etapa de Filtración 4

ID	Unidad	Valor	Supuesto
ALF4	kg/c	6,18E+03	Se considera el 4% de la corriente de entrada (Ed) (Rivada, 2008)
AcCY	kg/c	4,62E+02	1% AcCD (Rivada, 2008)
Y	kg/c	5,05E+04	Y = CaSO4+ AcCY + H2SO4ex + AgY AgY = 1% Y Se realiza tratamiento matemático y se reduce la expresión
SAcC	kg/c	1,10E+05	

Etapa 12. Evaporación

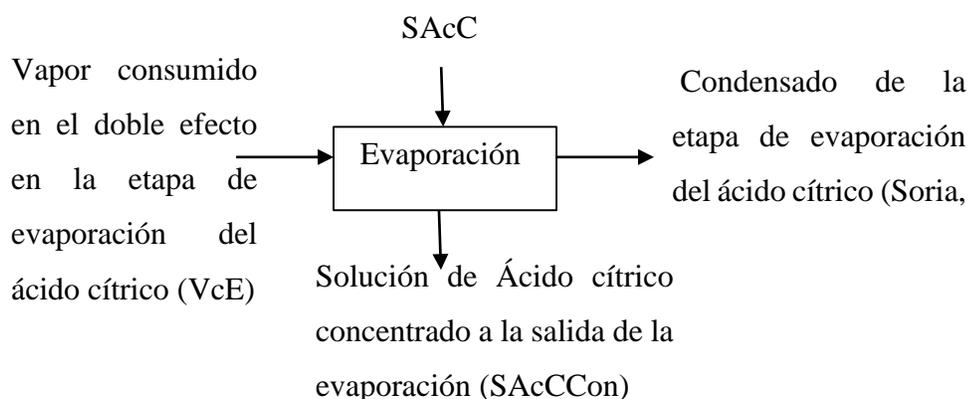


Figura 2.14 Etapa de Evaporación

Modelos empleados:

$$TSAcCCon = Tv2$$

$$CpSAcC = 3E - 04 * TSAcC^2 - 0.1441 * TSAcC + 17.188$$

$$VcE = (SAcC * CpSAcC * (TSAcCCon - TSAcC) + (E * h2))/hpr$$

$$CE = VcE$$

$$C6H807 = AcCD$$

$$SAcCCon = 1,67 * C6H807$$

$$AgC6H807 = 0,40 * SAcCCon$$

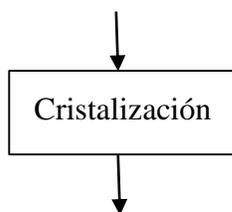
$$E = SAcC - SAcCCon$$

Tabla 2.12 Resultados de los balances etapa de Evaporación

ID	Unidad	Valor	Supuesto
TSAcCCon	K	376,81	Se desprecia la EPE en esta disolución y se considera que la temperatura a la salida del vaso evaporador de la solución es igual a la del vapor en el cuerpo de este
CpSAcC	kJ/kgK	0,89	Se determina el modelo a partir de graficar datos experimentales de $C_p = f(T)$ (DE KRUIF et al., 1982) y realizar un ajuste polinomial de la curva ($R^2 = 0,9528$)
VcE	kg/c	3,72E+04	
CE	kg/c	3,72E+04	
C6H8O7	kg/c	4,62E+04	Es igual al obtenido en la descomposición
SAcCCon	kg/c	7,72E+04	60% Ácido cítrico 40% Agua
AgC6H8O7	kg/c	3,09E+04	
E	kg/c	3,30E+04	

Etapa 13. Cristalización

SAcCCon



Cristales de Ácido cítrico a la salida del cristalizador

Figura 2.15 Etapa de Cristalización

Modelos empleados:

$$AcCCrist = 0,98 * C6H8O7$$

$$CristC6H8O7 = 0,9 * C6H8O7$$

Tabla 2.13 Resultados de los balances etapa de Cristalización

ID	Unidad	Valor	Supuesto
AcCCrist	kg/c	4,53E+04	se considera un 2% de pérdidas en el efluente de la cristalización con respecto a la entrada (Rodríguez, 2015)
CristC6H8O7	kg/c	4,16E+04	en la cristalización se reporta un rendimiento de cristales entre un 40-50% (Rivada, 2008) Se considera un 90% Cristalización

Etapa 14. Centrifugación

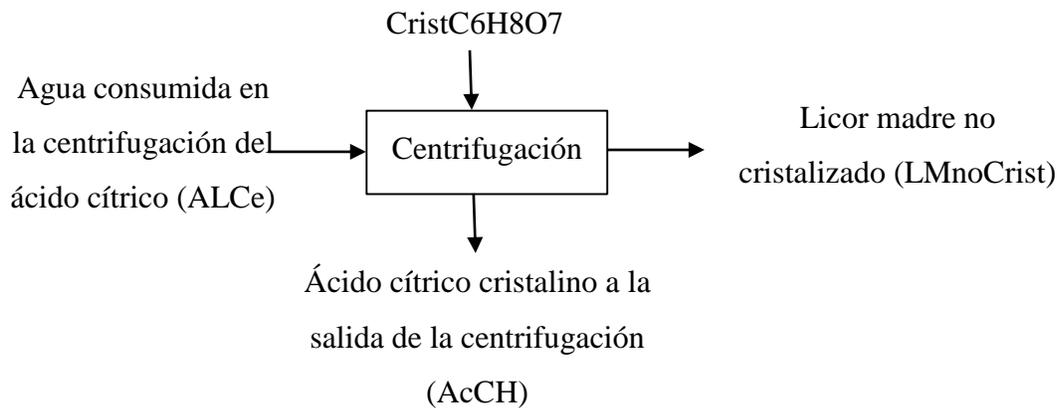


Figura 2.16 Etapa de Centrifugación

Modelos empleados:

$$ALCe = 0.05 * AcCCrist$$

$$AcCH = 0.99 * CristC6H8O7$$

$$LMnoCrist = AcCCrist + ALCe - AcCH$$

Tabla 2.14 Resultados de los balances etapa de Centrifugación

ID	Unidad	Valor	Supuesto
ALCe	kg/c	2,26E+03	5% del afluente a centrifugar (Rivada, 2008)
AcCH	kg/c	4,12E+04	1% de pérdida con respecto a los cristales obtenidos en la cristalización (Rivada, 2008)
LMnoCrist	kg/c	6,38E+03	

Etapa 15. Secado

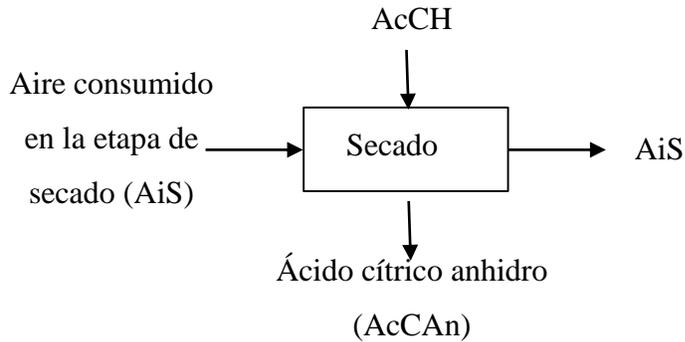


Figura 2.17 Etapa de Secado

Modelos empleados:

$$AcCAn = 0.95 * AcCH$$

$$AiS = AcCH * ((HAcCH - HAcCn)/(HAiS - HAiE))$$

Tabla 2.15 Resultados de los balances etapa de Secado

ID	Unidad	Valor	Supuesto
AcCAn	kg/c	3,91E+04	
AiS	kg/c	1,51E+05	

Conclusiones parciales:

1. La UEB Uruguay presenta las mejores condiciones desde el punto de vista geográfico, de disponibilidad de materia prima y potencial energético para el anexo de la planta de ácido cítrico.
2. El proceso tecnológico concebido consta de 15 etapas, agrupadas en tres secciones, producción de ácido cítrico, purificación y conformado del producto.
3. La miel final producida por la UEB no es suficiente para producir las 5 000 t/a de ácido cítrico, por lo que es necesario completar la cantidad requerida con miel de otras empresas azucareras.
4. Los modelos obtenidos y utilizados cuantifican adecuadamente las corrientes de entrada y salida a cada etapa del proceso.

Capítulo III: Análisis económico y ambiental de la planta de producción de ácido cítrico

En este capítulo se presenta la evaluación económica y ambiental del proceso de Ácido cítrico empleando como materia prima la miel final de la producción de azúcar crudo en la UEB “Uruguay”. La evaluación ambiental de este producto mediante la metodología del ACV no ha sido abordada con anterioridad en Cuba; por tanto, esta responde a la necesidad de complementar estudios de factibilidad realizados para la producción de Ácido cítrico a partir de sustratos azucarados.

3.1 Análisis económico de la planta de producción de ácido cítrico

Para la realización del análisis económico de la planta de producción de ácido cítrico y su determinación del costo de inversión, se parte del valor del costo de equipamiento de una planta de similar capacidad y materia prima, diseñada por Rivada (2008), cuyo costo de equipamiento es conocido y sería de 6 138 335,5 USD.

En las tablas de la 3.1 a la 3.6 se muestran los resultados del análisis económico realizado, siguiendo la metodología del Peters & Timmerhaus (1991), para la planta con una capacidad de producción de 5 000 t/a.

Tabla 3.1 Costo de Inversión

Entradas requeridas	% respecto al equipamiento	Resultados (USD)
Costo de equipamiento		6 138 335,5
Instalación de equipamiento	0,30	1 841 500,650
Instrumentación y control	0,13	797 983,615
Tuberías Instaladas	0,31	1 902 884,005
Sistema eléctrico	0,09	552 450,195
Edificaciones	0,14	859 366,970
Movimientos de terreno	0,10	613 833,550
Facilidades	0,10	613 833,550
Total de costos directos	1,43	13 320 188,035
Ingeniería y supervisión	0,25	1 534 583,875
Gastos constructivos	0,35	2 148 417,425
Gastos legales	0,04	245 533,420
Contratos	0,18	1 104 900,390

Contingencias	0,30	1 841 500,650
Total de costos indirectos	1,12	6 874 935,760
Inversión fija		21 791 091,025
Capital de trabajo	0.42	2 578 100,910
Costo total de inversión		22 711 841,350

Tabla 3.2 Costo de materias primas y materiales auxiliares

Materiales	Precio (USD /kg)	Cantidad (kg/a)	Costo (USD/a)
Ácido Cítrico	0,75	5 000 000	3 750 000
Ácido sulfúrico	0,35	277 000	96 950
Miel Final	0,30	1 480 000	444 000
Fosfato Monopotásico	1,00	36 900	36 900
Sulfato de Magnesio	0,50	4 920	2 460
Cloruro de Amonio	0,10	307 000	30 700
Ferrocianuro de potasio	2,00	123 000	246 000
Sulfato de Cinc	0,80	36 900	29 520
Aspergillus Niger	1,00	24 600	24 600
Óxido de Calcio	0,14	1 220 000	170 800
Costo Anual Materiales			1 081 930

Tabla 3.3 Utilidades

Utilidad	Requerimiento anual (kg/a)	Costo anual (USD/kg)
Electricidad	335	30,753
Vapor	8730	52 380
Agua	222 000	117 660

Tabla 3.4 Gastos en salario

Cantidad de operadores	Turnos por día	Salario (USD/h)	Costo anual en salario
30	3	0,9	194 400

Tabla 3.5 Costo total de producción

Ítem	Factor	Costo anual (USD/a)
Materia prima		1 081 930
Labores de operación		194 400
Operaciones de supervisión	0,1	19 440
Utilidades		170 070,753
Mantenimiento y reparación	0,02	402 674,809
Suministros	0,005	2 013,374
Impuestos de laboratorio	0,1	19 440
Costo Variable		1 889 968,936
Impuestos	0,02	402 674,809
Seguro	0,005	100 668,702
Renta	0,08*Edificaciones	5 499,949
Costos Fijos		508 843,460
Costo de Producción		2 398 812,395
Administración	0,15	92 477,221
Venta y distribución	0,05	138 404,979
Investigación y desarrollo	0,05	138 404,979
Gastos generales		369 287,179
Costo Total de Producción		2 768 099,574

Tabla 3.6 Indicadores dinámicos de la factibilidad

Indicador	Valor
Valor Actual Neto (VAN)	- 16 767 445,43 (USD)
Tasa Interna de Retorno (TIR)	
Período de recuperación de la inversión (PRD)	No se recupera la inversión

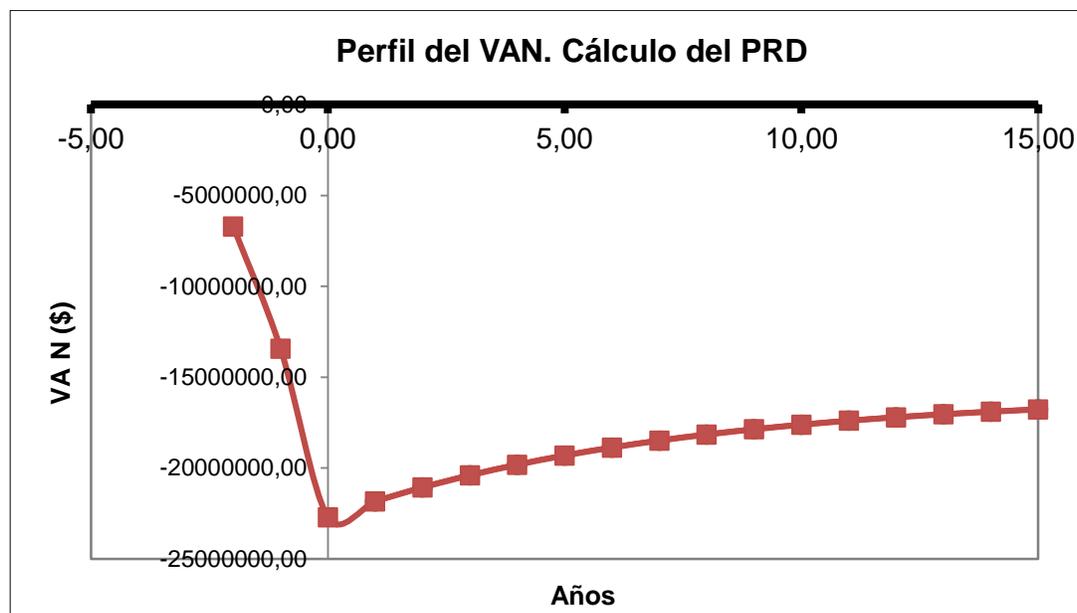


Figura 3.1 Perfil del VAN

Al analizar el comportamiento de los indicadores dinámicos de factibilidad, se concluye que una planta de ácido cítrico que emplea como materia prima miel final de caña de azúcar y que posea una capacidad de producción de 5 000 t/a, no será económicamente factible debido a los elevados costos y la baja capacidad producción. Para hacer de esta planta una unidad viable económicamente se hace necesario realizar un estudio de capacidad de producción que considere un aumento de la misma.

3.1.1 Estudio de capacidad de la planta de producción de ácido cítrico

El estudio de capacidad fue realizado para una planta de producción de ácido cítrico a partir de miel final de caña de azúcar en la cual fue considerado un aumento de su volumen de producción y se consideró como un estudio de casos donde se empleó como caso base la planta de 5 000 t/a y como casos de estudio la planta con las nuevas capacidades de producción (7 500, 15 000 y 20 000 t/a). Para el estudio se mantuvo constante el precio del producto y otros factores que pueden incidir en la toma de decisiones y se realiza nuevamente el estudio del comportamiento de los indicadores dinámicos de factibilidad, los cuales mostraron los resultados que se ilustran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Resultados de los indicadores dinámicos del estudio de casos

Indicadores	Caso Base (5 000 t/a)	Caso 1 (7 500 t/a)	Caso 2 (15 000 t/a)	Caso 3 (20 000 t/a)
VAN	- 16 767 445,43 (USD)	-4 642 487,78 (USD)	16 653 568,74 (USD)	32 903 565,67 (USD)
TIR		12 %	22 %	27 %
PRD	No se recupera la inversión	9,3 años	5,6 años	4,8 años

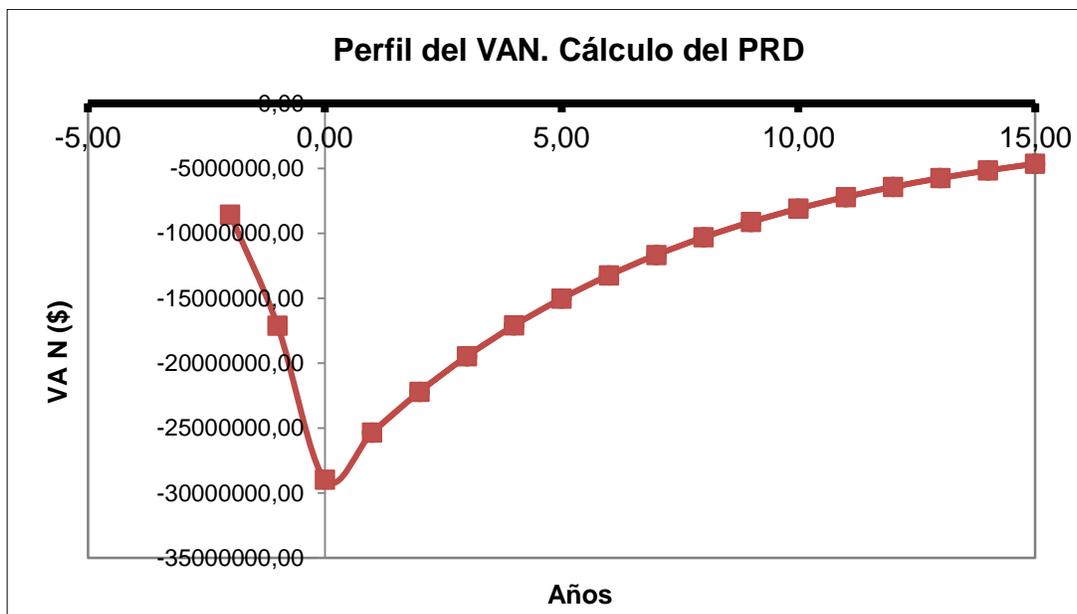


Figura 3.2 Perfil de VAN Caso 1

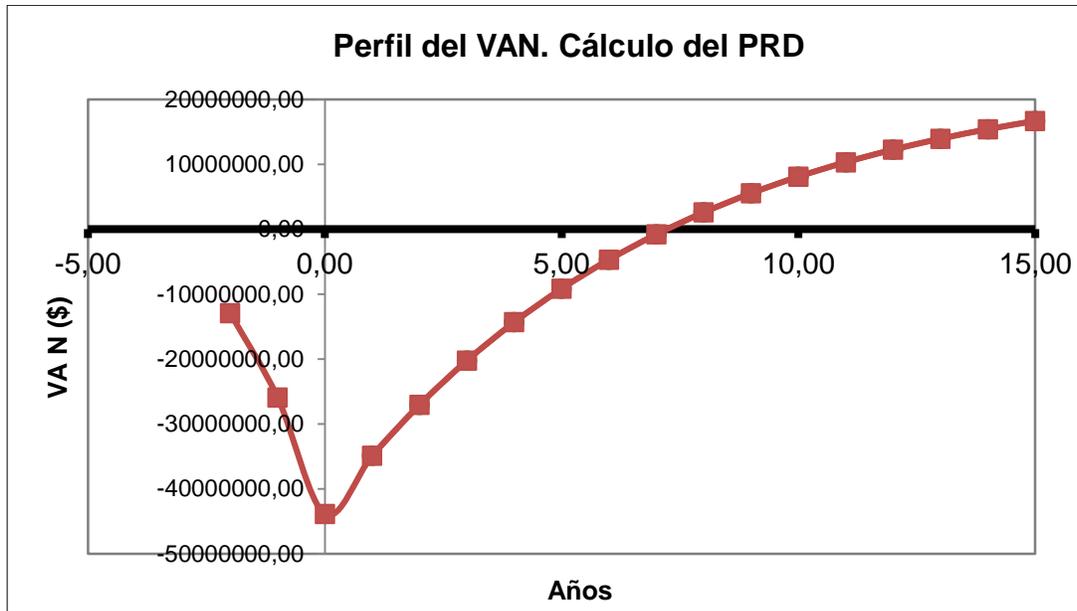


Figura 3.3 Perfil de VAN Caso 2

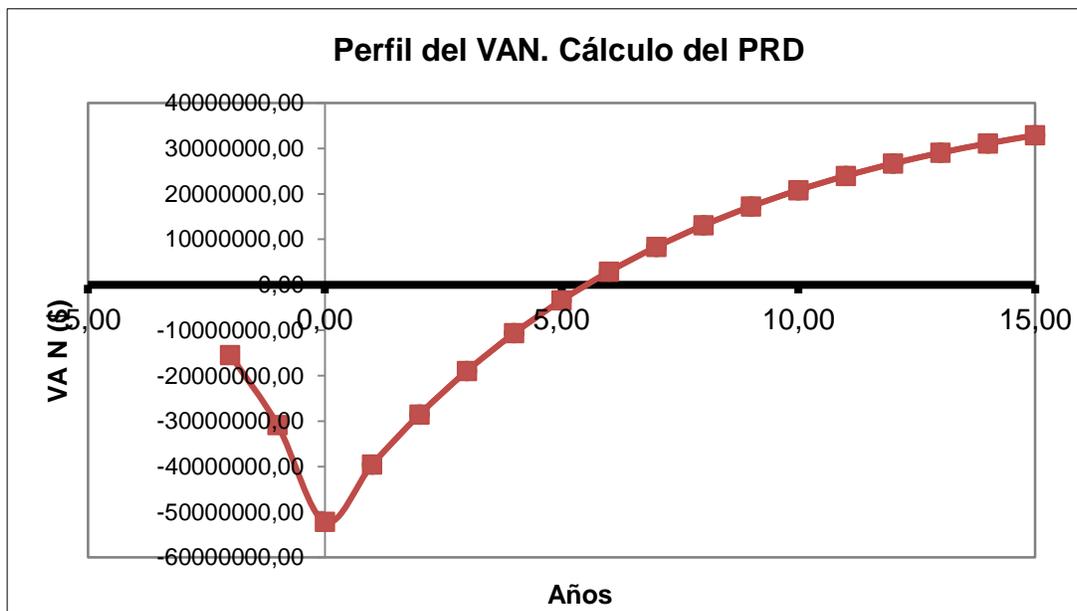


Figura 3.4 Perfil de VAN Caso 3

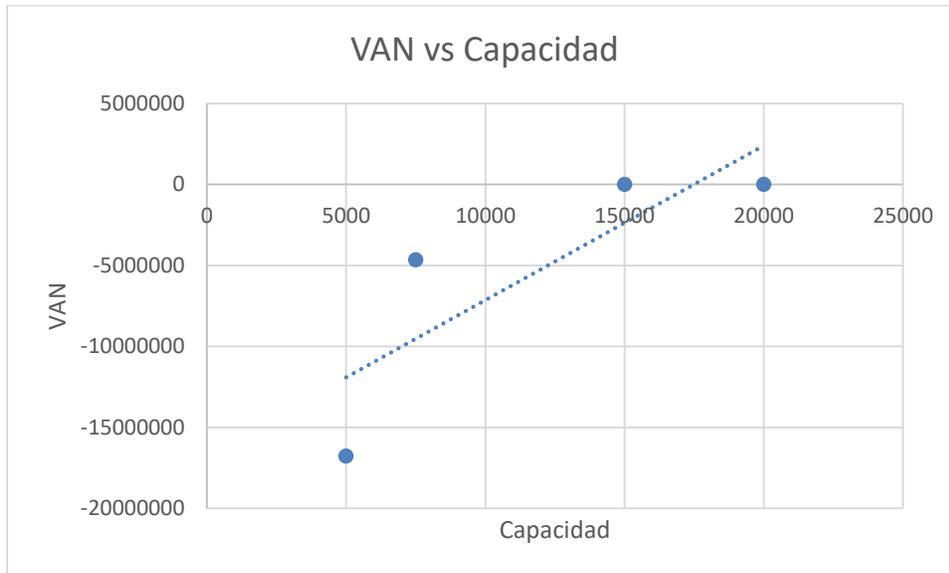


Figura 3.5 Línea de tendencia del VAN

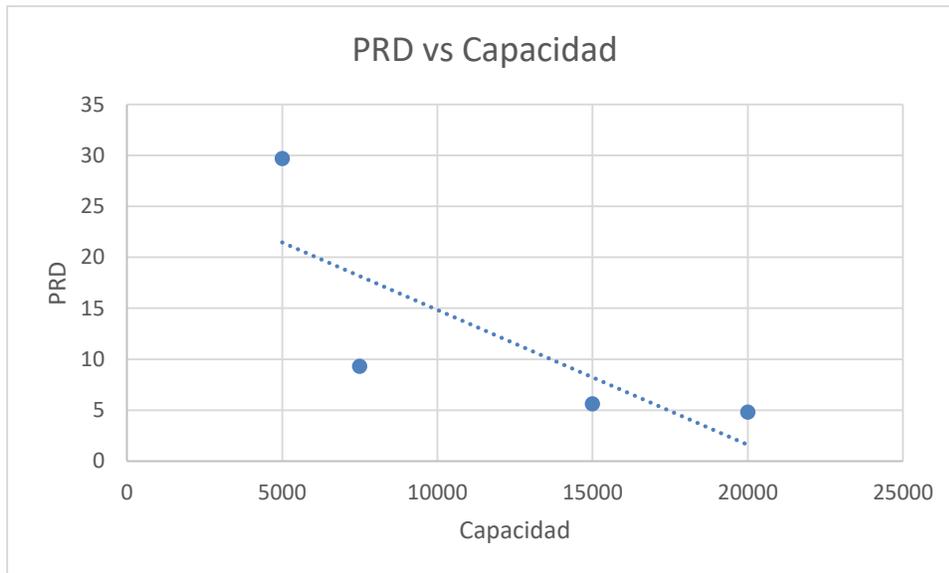


Figura 3.6 Línea de tendencia del PRD

Con el estudio de caso realizado fue comprobado que con un aumento en la capacidad de producción de la planta desde 5 000 hasta 20 000 t/a, sería económicamente factible la propuesta de inversión. Como se observa en las figuras 3.5 y 3.6, se aprecia que a medida que se incremente la capacidad de producción de la planta el VAN asciende favorablemente y el PRD disminuye. Con este incremento la planta tendría un período de recuperación de la inversión estimado en cinco años, a partir de los cuales comenzaría a obtener ganancias.

Para esta propuesta de capacidad se requieren 5 920 000 t/a de la materia prima (miel final) que sería una cantidad significativa para la cual sería necesario la contribución de miel de otras empresas azucareras de la región central.

3.2 Evaluación ambiental del ciclo de vida del ácido cítrico a partir de miel final

La evaluación ambiental del ciclo de vida del Ácido cítrico empleando como sustrato azucarado la miel final del proceso de azúcar crudo se realiza aplicando los principios y requisitos de las normas internacionales sobre ACV (NC-ISO 14 040, 2009; NC-ISO 14 044, 2009), la metodología de ACV propuesta por Contreras (2007) y la mostrada por Pérez (2016) para la modelación de los ICV parametrizados del azúcar crudo.

3.2.1 Definición del Objetivo y Alcance del estudio

La definición del objetivo(s) de un ACV y del alcance, determina las operaciones y/o procesos unitarios a incluir en el estudio, así como los flujos del inventario a modelar. Por tanto, es necesario que estén claramente definidos y sean coherentes con la aplicación prevista. En este estudio se plantea como objetivo: evaluar el impacto ambiental asociado al ácido cítrico producido a partir de miel final de caña de azúcar. En el alcance del estudio se incluyen los siguientes aspectos:

3.2.1.1 Sistema en estudio

En el ciclo de vida del ácido cítrico producido a partir de miel final de caña de azúcar se consideran tres subsistemas: agrícola, industrial y distribución-consumo como se identifica en la Figura 3.3

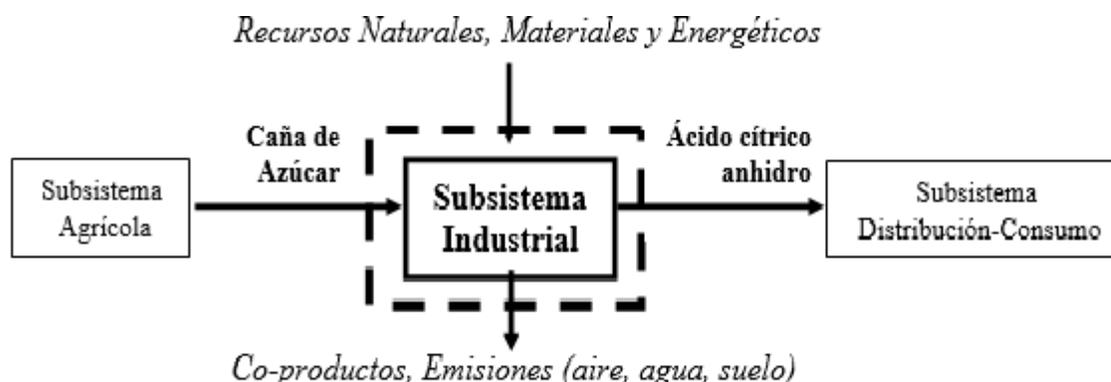


Figura 3.7 Modelo del ciclo de vida del ácido cítrico producido a partir de miel final

En el subsistema agrícola se incluye la preparación de la tierra, siembra, atenciones culturales, cosecha y transportación a la UEB. El subsistema industrial comprende la producción de azúcar crudo en la UEB Uruguay, integrándose a esta, la de ácido cítrico a partir de miel final. Las etapas incluidas en ambos procesos se abordaron en el capítulo anterior (Epígrafe 2.2 y 2.3, respectivamente); así como se presentan

en los diagramas de flujos correspondientes, mostrados en las Figuras 2.1 y 2.2, respectivamente, los cuales integrados constituyen el modelo del ciclo de vida del ácido cítrico producido a partir de miel final de caña de azúcar. En la distribución-consumo del producto se incluye el embalaje, la transportación, la distribución y el consumo en correspondencia al mercado de destino.

3.2.1.2 Función y unidad funcional

La función principal de la producción de ácido cítrico a partir de miel final de caña de azúcar es suplir la demanda de este producto en Cuba empleando una fuente de sustrato disponible en el territorio nacional; lográndose con esto beneficios económicos para el país al eliminar la importación del mismo. Todos los flujos de entrada y salida al sistema estarán referidos al ácido cítrico en un ciclo productivo como unidad más representativa de los mismos (unidad funcional).

3.2.1.3 Límites del sistema

El estudio se limita al objetivo establecido y al conocimiento del ciclo de vida del sistema. En la Figura 3.3, se enmarcan por líneas discontinuas el subsistema incluido dentro de los límites del sistema. Se excluye el primer subsistema por reportarse evaluaciones ambientales del ciclo de vida del azúcar crudo que incluye este y destacan la producción agrícola de la caña de azúcar con marcados perjuicios ambientales en comparación con el proceso industrial (Contreras, 2007, Contreras and Rosa, 2009, Pérez et al., 2016) y en este estudio es importante determinar el perfil ambiental del subsistema industrial para analizar la factibilidad de producción del ácido cítrico. No se considera el tercer subsistema al presentar el producto variados mercados de destino. Ambos subsistemas excluidos de los límites del sistema no se consideran en el objetivo definido. En función de la inclusión de subsistemas el estudio se clasifica “de la puerta a la puerta”.

3.2.2 Análisis del inventario del ciclo de vida (AICV)

En esta etapa se relaciona toda la información cualitativa y cuantitativa requerida para conformar el Inventario del Ciclo de Vida (ICV). En la práctica, el ICV es una lista de recursos, productos, co-productos y emisiones.

3.2.2.1 Flujos del inventario

De acuerdo a la NC-ISO 14 044 (2009), existen tres tipos de flujos principales: elementales, intermedios y de productos. En la Tabla 3.8a se agrupan los flujos elementales y de productos (identificados en las Figuras Anexo 2 y 2.3 a 2.17 (Epígrafe 2.4), respectivamente), en entradas o salidas a los límites del sistema. Los flujos entre las diferentes operaciones unitarias clasifican como intermedios.

Tabla 3.8 Flujos del ICV del ácido cítrico

Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)			
Agua	Aire		
Entradas conocidas desde la tecnosfera (materiales/combustibles)			
Caña de Azúcar	Ácido clorhídrico	Fosfato trisódico	Sulfato de magnesio
Ácido fosfórico	Hidróxido de sodio	Azúcar en polvo	Sulfato de hierro
Lechada de cal	Etanol	Sulfato de potasio	Sulfato de cinc
Floculante	Carbonato de sodio	Cloruro de amonio	Ácido sulfúrico
Salidas conocidas a la tecnosfera (productos/co-productos)			
Ácido cítrico anhidro	Residuales Líquidos	Cenizas de la combustión del bagazo	
Azúcar Comercial	Yeso (sulfato de calcio)	Micelio de la fermentación	
Dióxido de carbono	Bagazo	Cachaza	
Emisiones al aire			
Nitrógeno	Óxidos de nitrógeno	Materia orgánica policíclica	
Oxígeno	Monóxido de carbono	Material Particulado	
Argón	Dióxido de azufre	Vapor de agua	
Emisiones al agua			
Filtrado de la solución de Citrato de calcio			
Emisiones al suelo			
Impurezas contenidas en la Miel Final			

3.2.2.2 Asignación de cargas ambientales

En correspondencia a la NC-ISO 14 040 (2009) siempre que sea posible se debe evitar la asignación de cargas ambientales, extendiendo los límites del sistema para incluir funciones adicionales relacionadas con los co-productos (valorizarlos). En este estudio el ácido cítrico se identifica como el producto principal y se evalúan los co-productos (azúcar comercial y bagazo) unido a determinadas emisiones (Dióxido de carbono, residuales líquidos, cenizas de la combustión del bagazo, yeso, micelio de la fermentación y la cachaza) como productos evitados. En la Tabla 3.8b se relacionan los productos que estos evitan al tener funciones similares.

Tabla 3.9 Relación de productos evitados

Co-producto/Residuo	Producto Evitado
Azúcar Comercial	Azúcar Comercial
Dióxido de carbono	Dióxido de carbono extraído de emisiones gaseosas industriales
Residuales Líquidos	Fertilizante portador de nitrógeno (Urea)
Yeso (sulfato de calcio)	Yeso de extracción mineral
Bagazo	Combustible (petróleo)
Cenizas	Fertilizante portador de potasio (Cloruro de potasio)
Micelio de la fermentación	Alimento animal producido en la fermentación de la remolacha
Cachaza	Fertilizantes (superfosfato triple, cloruro de potasio, urea)
Electricidad	Electricidad generada a partir de petróleo

Basado en la descripción del sistema en estudio, lo cual se corresponde a lo detallado para la producción de azúcar crudo y de Ácido cítrico (Epígrafe 2.2 y 2.3, respectivamente) y la clasificación de los flujos se modela el ICV parametrizado para la producción de ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar. La modelación comprende la compilación de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas referidas a la unidad funcional.

3.2.2.3 Datos del inventario del ácido cítrico

En el subsistema industrial es posible recoger información precisa y representativa de las condiciones reales de operación, debido al régimen de cómputo de la información del proceso industrial implementado en el sector azucarero (software IPLUS). Los datos de primer plano para el sistema en estudio están relacionados con los flujos de los procesos unitarios que intervienen y sus propiedades, correspondientes a la contabilidad industrial de la Zafra 2019 de la UEB “Uruguay”. Los datos de fondo responden a índices de consumo de materiales y emisiones, propiedades físicas de los flujos, rendimientos, variables operacionales (presión y temperatura) medidas aleatoriamente en el período en que se compilan los datos de primer plano. Ambos datos se clasifican como parámetros de entrada en ACV. Para garantizar la fiabilidad de la información, es necesario evaluar la incertidumbre asociada a los parámetros de entrada.

3.2.2.3.1 Incertidumbre en los parámetros del ICV

La incertidumbre en los parámetros del ICV se representa por la función de distribución de probabilidad (FDP) que mejor se ajuste al conjunto de datos compilados para cada parámetro. La determinación de la FDP se realizó con el programa profesional Statgraphics Centurion V15.2, aplicando la prueba estadística no paramétrica de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Se selecciona como la FDP que mejor se ajusta la que presenta el mayor valor del estadístico (p-valor) de la prueba realizada.

En la tabla del Anexo 1 se resumen los parámetros de entrada del ICV con sus estadígrafos correspondientes. Se verifica con el p-valor de cada parámetro, que los conjuntos de datos de cada uno provienen de la FDP que se identifica con un 95 % de confianza. Se emplea el coeficiente de variación (CV) para lograr homogeneidad en la comparación de los parámetros con distintas distribuciones.

Cuando se dispone de escasa información o un único valor para un parámetro se estima la incertidumbre mediante la Matriz de Pedigree, lo cual introduce incertidumbre por los criterios de evaluación de expertos.

Los resultados del análisis estadístico mostrados en tabla del Anexo 1, muestran que la mayor tendencia en los parámetros es a una distribución normal. Cuando la distribución es normal, el parámetro puede tomar cualquier valor, siempre que sean positivos para los parámetros analizados, por la naturaleza de la información.

3.2.2.4 Suposiciones y limitaciones del ICV

Para garantizar la fiabilidad y la aplicación de los resultados del estudio es necesario relacionar las suposiciones y/o limitaciones consideradas para modelar el ICV. En adición a las consideraciones abordadas en el *Epígrafe 2.4* para la cuantificación de los flujos del proceso en cada una de las etapas se plantea que:

1. El floculante de la clarificación del jugo mezclado es modelado como un compuesto químico inorgánico.
2. Las impurezas separadas al filtrar la miel final se modelan como una mezcla de impurezas.
3. No se modela el consumo del hongo *aspergillus niger* empleado en la fermentación al no disponerse en la base de datos del programa profesional SimaPro V9.0.0.35 empleado para la evaluación ambiental del sistema en estudio.
4. El filtrado de la solución de citrato de calcio que se reporta con un 3% (Rivada, 2008) de sólido se modela como un residual líquido.

5. El yeso (sulfato de calcio) obtenido en la filtración del efluente de la descomposición es modelado como un aditivo de materiales de construcción, no considerándose el contenido de ácido cítrico en este (1% (Rivada, 2008)).
6. El micelio separado en la filtración del fermentado se modela como alimento animal.

3.2.2.5 Modelación del ICV parametrizado

En la modelación del inventario parametrizado del ácido cítrico producido a partir de miel de caña de azúcar, además de la clasificación abordada en el *Epígrafe 3.2.2.3* para los datos de primer plano y de fondo como Parámetros de Entrada, se clasifican como Parámetros Calculados a los modelos matemáticos correspondientes a los balances de masa y energía, propiedades físicas y termodinámicas, así como correlaciones numéricas dadas por factores de emisión, consumo o rendimientos. En la tabla del Anexo 1 se presentan los parámetros calculados correspondientes al azúcar crudo y en las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 hasta la 2.15, se exhiben los del ácido cítrico por etapas del proceso.

Los modelos son editados en el SimaPro V9.0.0.35, permitiendo la evaluación cuantitativa de los diferentes flujos del ICV del proceso en función de las variables operacionales y las características de la alimentación (parámetros de entrada), así como la evaluación ambiental del Ácido cítrico producido a partir de miel de caña de azúcar.

3.2.3 Evaluación de Impactos

La evaluación de impactos ambientales se realiza con el método ReCiPe 2016 y empleando el programa profesional SimaPro V9.0.0.35. Este método modela los indicadores orientados a los problemas ambientales y a los daños mediante dos acercamientos: uno a nivel de punto intermedio (Midpoint) incluyendo 18 categorías de impactos y otro de punto final (Endpoint), que contiene tres categorías de daños (a la salud humana, a los ecosistemas y a los recursos).

3.2.4 Interpretación

En la Figura 3.4 se presenta el perfil ambiental de la producción de ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar. Los resultados indican el por ciento que representa el impacto de cada flujo considerado en el ICV con relación al impacto total de la categoría. Los valores con signo negativo identifican los efectos ambientales beneficiosos, a diferencia de los valores positivos que indican daños.

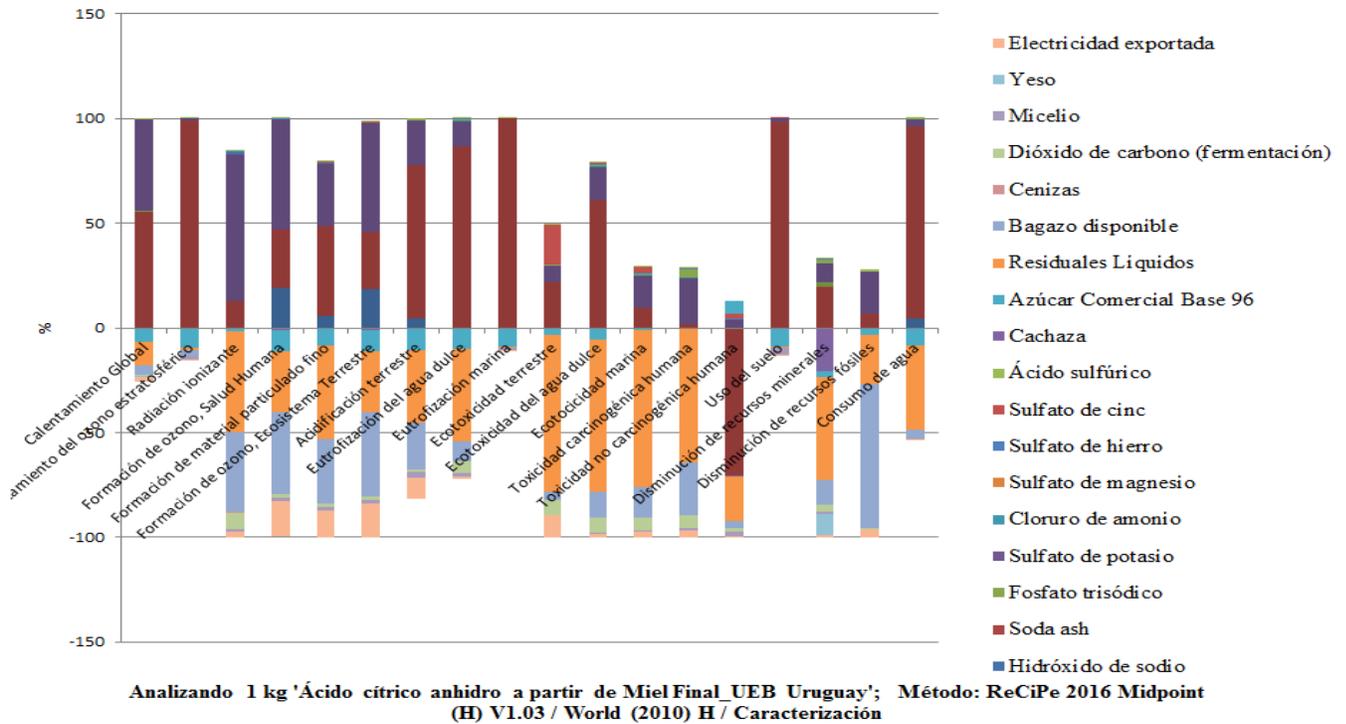


Figura 3.8 Perfil ambiental del ácido cítrico por categorías de impacto. Caracterización

En la tabla (Anexo 6) se resumen los valores numéricos, a partir de los cuales se clasifican en beneficiosas o perjudiciales, las categorías de impactos evaluadas por el ReCiPe 2016 para el escenario en estudio. Esta clasificación se resume en la Tabla 3.d.

Tabla 3.10 Clasificación de las categorías de impacto

Beneficiosas	Perjudiciales
Radiación ionizante	Calentamiento global
Formación de material particulado fino	Agotamiento del ozono estratosférico
Formación de ozono, Ecosistema Terrestre	Formación de ozono, Salud Humana
Ecotoxicidad terrestre	Acidificación terrestre
Ecotoxicidad del agua dulce	Eutrofización del agua dulce
Ecotoxicidad marina	Eutrofización marina
Toxicidad carcinogénica humana	Uso del suelo
Toxicidad no carcinogénica humana	Consumo de agua
Disminución de recursos minerales	
Disminución de recursos fósiles	

Se observa que la mayoría de los flujos del ICV modelados como producto evitado presentan beneficios ambientales en las categorías de impactos evaluadas al evitar los perjuicios asociados a los productos que estos sustituyen. No reportan incidencia, la consideración del empleo de la cachaza como fertilizante portador de fósforo y del yeso obtenido de la descomposición del citrato de calcio en la categoría uso del suelo. Esto se puede interpretar como la existencia de un equilibrio entre el empleo del recurso suelo para la extracción las fuentes de fósforo y calcio para la fabricación de fertilizante y el sulfato de calcio, respectivamente y la incidencia en el mismo de la deposición de estos productos.

Se evidencia que el azúcar crudo ejerce un efecto indeseado en toxicidad no carcinogénica humana, asociado al consumo de sustancias químicas, principalmente el óxido de calcio para la preparación de la lechada de cal. Desde la extracción del mineral hasta su consumo se produce emisión de material particulado, dada la naturaleza del producto. Esto incide desfavorablemente en la salud humana de las personas incorporadas a su ciclo de vida. También, las emisiones gaseosas y de material particulado generadas en la combustión de la biomasa cañera son identificados como flujos del ICV del azúcar crudo que producen efectos indeseables en la salud humana de mostrados en diferentes estudios (PÉREZ et al., 2013, RODRÍGUEZ et al., 2014, Pérez et al., 2016).

La identificación de las categorías de mayores beneficios o perjuicios al medio ambiente, del sistema del producto evaluado, se realiza a partir de los resultados normalizados que se muestran Figura 3.5 y en la tabla (Anexo 8).

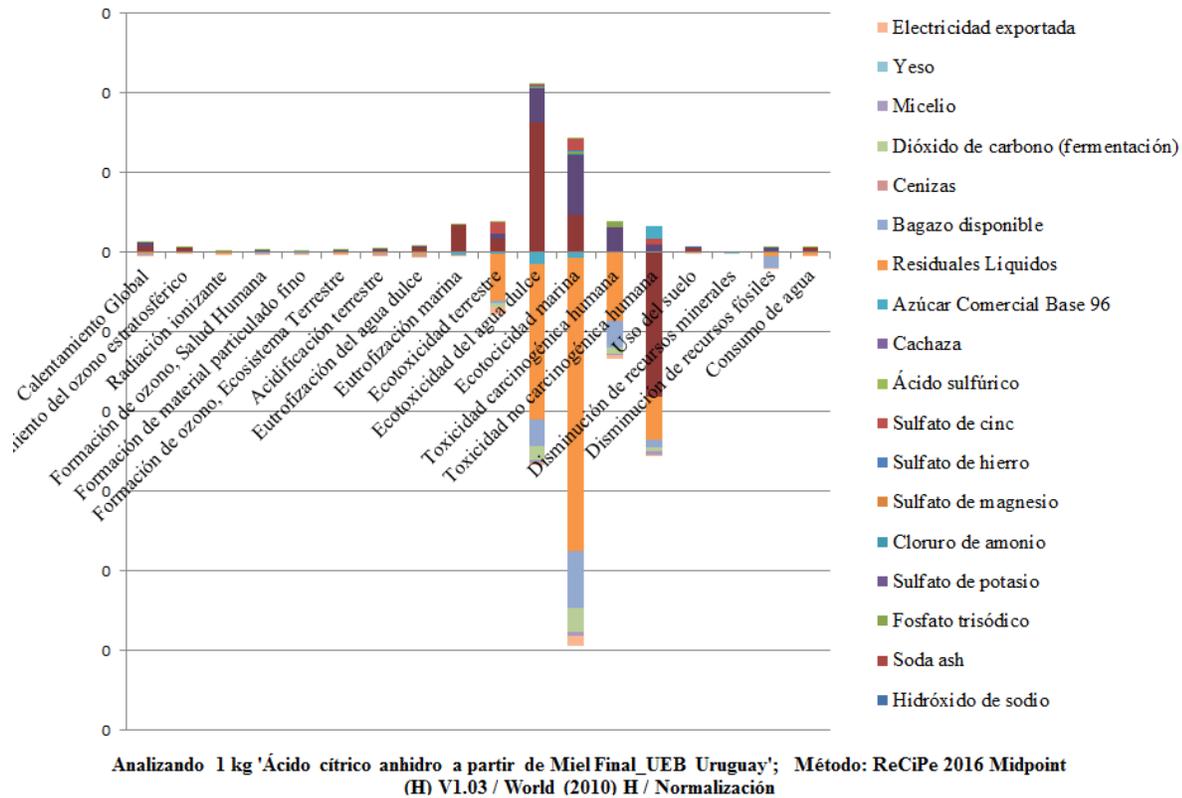


Figura 3.9 Perfil ambiental del ácido cítrico por categorías de impacto. Normalización

Las categorías que presentan los mayores beneficios ambientales de las diez obtenidas en esta clasificación son: ecotoxicidad marina y toxicidad no carcinogénica humana, seguidas por toxicidad carcinogénica humana, ecotoxicidad del agua dulce y terrestre. El flujo del ICV que define la contribución favorable a la ecotoxicidad marina es el empleo de los residuales líquidos en sustitución de un fertilizante portador de nitrógeno (urea); además, del empleo del bagazo como sustituto de un combustible fósil (petróleo) y el dióxido de carbono producto de la fermentación de la miel. La recuperación de este gas de la fermentación es práctica recomendada en procesos fermentativos.

Los residuales líquidos destinados a fertirriego por su contenido de nitrógeno en sustitución de la urea presentan los mejores resultados en la mayoría de las categorías de impactos evaluadas (11), seguido por la sustitución de petróleo por el bagazo disponible en la industria. Ambas opciones de gestión de residuo y co-producto, respectivamente, se confirman como prácticas amigables con el medio ambiente.

Por otra parte, se obtiene el mayor deterioro ambiental en eutrofización marina ponderado por el consumo de caña de azúcar. En la mayoría de las categorías de impactos, este flujo presenta la mayor incidencia. Resultados influenciados por los daños asociados al empleo de fertilizantes y pesticidas demandados en el cultivo de la gramínea. En menor medida se destacan: el calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, uso del suelo, consumo y eutrofización del agua dulce.

Al analizar el perfil ambiental de la evaluación del daño, mostrado en la Figura 3.6, se corrobora que la valorización de los residuales líquidos y del bagazo reportan los mejores resultados de los flujos modelados en el ICV como productos evitados; con influencia marcada en la categoría recursos, la sustitución de un combustible fósil por un co-producto del proceso. Además, se observa que la caña de azúcar y la lechada de cal exhiben las mayores contribuciones en las tres categorías de daños debido a los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de cada producto, lo cual ha sido abordado en la interpretación de los resultados por categorías de impactos. Por la representación gráfica se identifican las categorías salud humana y ecosistemas con resultados desfavorables, no así la de recursos.

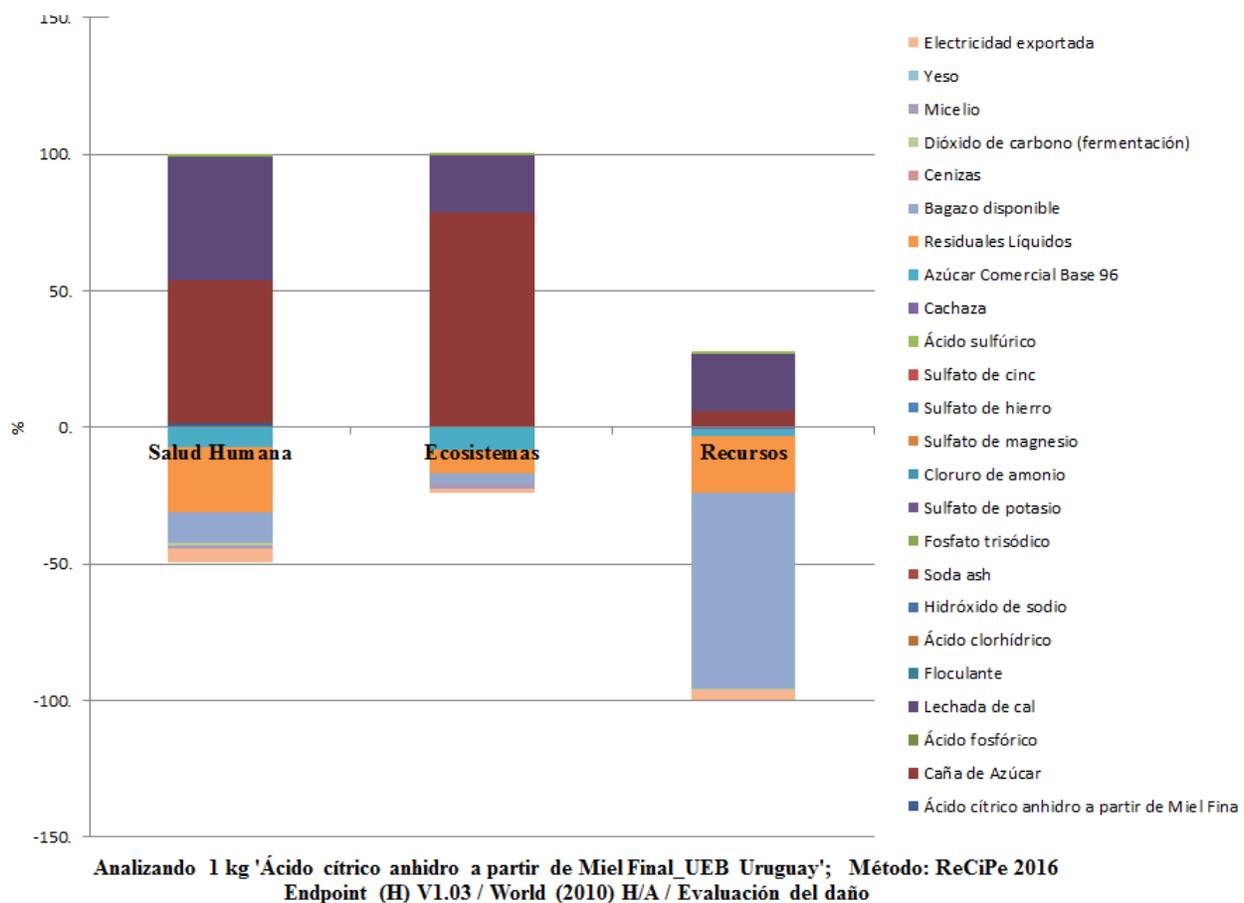


Figura 3.10 Perfil ambiental del ácido cítrico por categorías de daños. Evaluación del daño

El análisis de la contribución de cada flujo del ICV a las categorías de daños puede ser consultado en la tabla (Anexo 10), lo cual confirma que se obtienen efectos perjudiciales en la salud humana (458.92 mPt) y los ecosistemas (138.57 mPt), así como beneficios en recursos (-22.13 mPt). En consecuencia, el impacto ambiental global (575.35 mPt) para el sistema en estudio indica que el ácido cítrico a partir de

miel de caña de azúcar contribuye al deterioro ambiental, siendo necesario proponer, ejecutar y evaluar acciones para mejoramiento ambiental.

3.2.5 Propuesta de mejoras

En función de la interpretación de la evaluación ambiental del ciclo de vida del ácido cítrico producido a partir de miel final, se proponen mejoras que deben ser analizadas técnica y económicamente para garantizar la factibilidad de la propuesta. Esta debe anexarse al plan de medidas de Producción más Limpia de las empresas para garantizar y contribuir a la sostenibilidad del producto. A continuación, se relaciona algunas mejoras que deben favorecer el desempeño ambiental del producto en estudio:

1. Disminuir o sustituir el empleo de fertilizantes y pesticidas químicos por productos ecológicos.
2. Aumentar los rendimientos agrícolas para obtener mayor masa de gramínea con igual uso del recurso suelo.
3. Mantener una adecuada disciplina tecnológica de todos los procesos que tributan al de ácido cítrico, en especial, la producción de azúcar y los sistemas auxiliares integrados.
4. Evaluar la instalación de sistemas de depuración de gases en la industria azucarera que reduzca la emisión de gases y material particulado en la generación de vapor.
5. Evaluar la transferencia de sistemas de generación de vapor de baja presión al de presiones superiores caracterizados por mayores eficiencias, lográndose con esto aumentar la disponibilidad de bagazo para ser empelado como combustible, reducir emisiones y hacer un uso eficiente de los portadores energéticos.

En este trabajo no se presenta la evaluación ambiental de las mejoras propuestas por no ser objetivo del estudio.

Conclusiones parciales:

1. Los resultados del costo de inversión de la planta propuesta son aceptables, tomando como base lo reportado por Rivada (2008) en equipamiento invertido.
2. Para la capacidad de producción propuesta el proceso de producción concebido no es rentable.
3. La modelación del ICV para la producción de ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar se realizó en función de balances de masa y energía, propiedades físicas y termodinámicas, así como correlaciones numéricas dadas por factores de emisión, consumo o rendimientos.

4. La valorización de los co-productos y residuos del proceso muestran beneficios ambientales en la mayoría de las categorías de impactos evaluadas, destacándose el uso de los residuales líquidos y el bagazo como fertilizante y combustible, respectivamente.
5. La caña de azúcar es el flujo del ICV que presenta los mayores perjuicios ambientales, influenciando los resultados desfavorables en las categorías de daños salud humana y ecosistemas.
6. Los perjuicios obtenidos en las categorías de daños salud humana y ecosistemas, desfavorecen el desempeño ambiental del ácido cítrico producido a partir de miel de caña de azúcar.

Conclusiones generales:

1. Debido al poco aprovechamiento de la miel final en la UEB Uruguay y a su composición, fue seleccionada como la materia prima principal para la producción de ácido cítrico, a partir de la cual se identificó la tecnología a utilizar.
2. Se logra establecer el esquema tecnológico de la planta para la producción de ácido cítrico a partir de miel final integrada a la producción de azúcar crudo en la UEB Uruguay, el cual consta de 15 etapas agrupadas en tres secciones: producción, purificación y conformación del producto.
3. Los resultados de la evaluación económica no son satisfactorios para la capacidad propuesta de 5 000 t/a obteniéndose un VAN de -16 767 445,43 (USD) donde no se logra una recuperación de la inversión para la vida útil estimada de 15 años.
4. En un análisis de alternativas de capacidad de producción solo se logra factibilidad del proceso para producciones mayores de 15 000 t/a lo que implica tener disponible una cantidad de materia prima superior a 44 400 t/a la cual representa una cantidad significativa.
5. La evaluación del desempeño ambiental del ácido cítrico integrada a la del azúcar crudo reporta un desempeño ambiental desfavorable dado a los resultados perjudiciales obtenidos en las categorías de daño salud humana y ecosistemas.
6. La valorización de los co-productos y residuos del proceso favorecen el desempeño ambiental del ácido cítrico producido a partir de miel final de caña de azúcar al reportarse beneficios ambientales en la mayoría de las categorías de impactos evaluados.

Recomendaciones:

1. Realizar el dimensionamiento del equipamiento de cada una de las etapas estableciendo el número de equipos necesarios para realizar una producción continua.
2. Realizar un estimado más detallado del costo de inversión de la planta teniendo en cuenta los resultados de la recomendación anterior.
3. Comparar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la propuesta presentada en esta investigación para producir ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar con la de nuevos escenarios que empleen diferentes sustratos azucarados.
4. Incluir en los límites del ciclo de vida del ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar la etapa agrícola de producción de caña de azúcar para evaluar la influencia de esta en el desempeño ambiental del sistema en estudio.
5. Realizar la evaluación técnica, económica y ambiental de la propuesta de mejoras ambientales presentadas.
6. Seleccionar de las alternativas de valorización de las emisiones (cenizas, cachaza y residuales líquidos) y del bagazo de caña de azúcar como co-producto del ciclo de vida de la producción de ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar, la que mejor desempeño ambiental reporta.

Bibliografía

1. <https://spanish.alibaba.com> [Online]. [Accessed].
2. www.goodfellow.com/s/calcio.html [Online]. [Accessed].
3. 2000. Environmental management. LCA. Goal and scope definition and inventory analysis. NC ISO 14041. NC ISO 14041: National Office of Normalization.
4. 2005. Environmental management. Life Cycle Assessment. Principles and framework. NC ISO 14040. Havana City. Cuba: National Office of Normalization.
5. ABÍN, L., COTO, O., MARRERO, B. & MARRERO, J. 2002. Estudio fisiológico de la producción de ácido cítrico por *Aspergillus niger* O-5. Revista CENIC. Ciencias Biológicas.
6. ABSTENGO, E. 2018. Integración de una planta de ácido cítrico de bagazo de caña al Central Azucarero Uruguay., Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
7. ALI, S., IKRAM-UL-HAQ, QADEER, M. A. & IQBAL, J. 2002. Production of citric acid by *Aspergillus niger* using cane molasses in a stirred fermentor.
8. ALZAND, K., UNAI, S., KARADENIZ, M., MANSOR, S. & BOUFARIS, M. 2017. An Experimental Study on Citric Acid Production by *Aspergillus niger* Using Date Extract By-Product as a Substrate
9. AZÚCAR, I. C. D. I. D. L. D. D. L. C. D. 2000. Manual de los Derivados de la Caña de Azúcar, Ciudad Habana, Cuba.
10. BALDERRAMA-MARTÍNEZ, K., MENDOZA-MONTAÑO, L., RAMÍREZ-VARGAS, D. A., HERNÁNDEZ-PÉREZ, A. D. & PADILLA-VIVEROS, A. Producción de ácido cítrico en cultivo sumergido con *Aspergillus niger*.
11. BETANCOURT, A. L. 2003. Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación en cultivo líquido. Universidad Nacional de Colombia.
12. BLANCO, G. & HERRYMAN, M. 2005. Situación mundial y tendencias en la producción de ácido cítrico.
13. CABELLO, B. 2006. La producción de derivados de la caña de azúcar en Cuba. Situación y perspectiva. ICIDCA.
14. CHATURVEDI, M., SINGH, M. & MAN CHUGH, R. 2010. Citric acid production from cane molasses using submerged fermentation by *Aspergillus niger* ATCC9142.
15. CHEMISTRY), S. S. F. E. T. A. 1991. "A Technical Framework for Life Cycle Assessments", Washington, D.C.

16. COMPANIONI, D. 2009. Análisis del Ciclo de Vida de la producción de Azúcar Crudo en la Empresa "Ecuador". Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
17. CONTRERAS, A. M. 2007. Metodología para el análisis del ciclo de vida combinado con el análisis energético en la industria azucarera cubana. . Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
18. CONTRERAS, A. M. & ROSA, E. 2009. Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar productions.
19. DE KRUIF, C. G., VAN MILTENBURG, J. C., SPRENKELS, A. J. J., STEVENS, G., DE GRAAF, W. & DE WIT, H. G. M. 1982. THERMODYNAMIC PROPERTIES OF CITRIC ACID AND THE SYSTEM CITRIC ACID-WATER
20. ESCUDÉ, A. I. 2007. Producción de Ácido Cítrico a Partir de Aguas Residuales con Altos Contenidos de Almidón Mediante Fermentación de *Aspergillus niger* unigras 0007 ASP HSA Utilizando Microorganismos Libres e Inmovilizados. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO".
21. GÓMEZ, A. L. 2012. Efecto de la variación de los niveles de P & K en la producción de ácido cítrico utilizando una cepa de *Aspergillus niger*. Universidad Nacional de Colombia.
22. GONZÁLEZ, A. 2015. Estudio de viabilidad de una planta de producción de ácido cítrico por fermentación.
23. GONZÁLEZ, L. A. 2016. Plan director Uruguay.
24. GONZÁLEZ, M., GONZÁLEZ, E., GONZÁLEZ, V. & ALBERNAS, Y. 2012. Impacto de la integración de los procesos de azúcar y derivados. Tecnología Química, XXXIII.
25. GUERRA, L. E. 2018. Sustitución de agentes químicos agresivos en pretratamientos ácidos a los residuos lignocelulósicos agroindustriales. Caso bagazo de caña de azúcar., UNIVERSIDAD DE CAMAGÜEY "IGNACIO AGRAMONTE LOYNAZ".
26. HUGOT, E. 1986. Handbook of Cane Sugar Engineering, New York, Elsevier Science Publisher B.V.
27. KEENAN, J. & KEYES, F. 1988. Steam Tables, Thermodynamic Properties of Water including vapor, Liquid and solid phases.
28. LABONI MAJUMDER, I. K., KAMRUZZAMANMUNSHI, M., KHORSHEDALAM, H.-O., BEGUM, R. & ALAM., N. 2010. Citric Acid Production by *Aspergillus niger* Using Molasses and Pumpkin as Substrates.

29. LEAL, D., PICO, Y., CASTRO, J., GUERRA, J. & CASTRO, G. 2005. PRODUCCION DE ÁCIDO CÍTRICO A PARTIR DE SUERO LÁCTEO ENTERO E HIDROLIZADO CON *Aspergillus niger*, POR VÍA FERMENTATIVA.
30. LIÑAN, S. D. & MALDONADO, W. 2013. Comparación del rendimiento del ácido cítrico extraído del *Malpighia Emarginata* (Semeruco) con respecto al extraído del limón, naranja y piña. Rafael Urdaneta.
31. LLANES, E. & COLABORADORES 2005. Propuesta de aplicación de herramienta de gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida a la actividad agrícola. Revista Ciencias.com <<http://www.revistaciencias.com/>>.
32. LÓPEZ, C. A., ZULUAGA, A., HERRERA, S. N., RUIZ, A. A. & MEDINA, V. I. 2005. PRODUCTION OF CITRIC ACID WITH *Aspergillus niger* NRRL 2270 FROM MILK WHEY Universidad Nacional de Colombia.
33. LÓPEZ GONZÁLEZ, L., SORIANO, L. D. L. C. & GÓMEZ RUÍZ, M. 2006. Estudio de las diferentes capacidades para la producción de ácido cítrico en la región central de Cuba. Centro Azúcar, Vol. 33.
34. LÓPEZ, Y. 2005. Análisis de integración de procesos al CAI Uruguay para la diversificación de la industria azucarera., Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
35. LUGO, P. 2017. EVALUACIÓN DEL USO DE LA VINAZA (RESIDUO INDUSTRIAL) PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO EMPLEANDO *Aspergillus niger*. . UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
36. MANALS, E. M., PENEDO, M. & SALAS, D. 2015. Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. Tecnología Química.
37. MARÍN, M. 2017. Descripción del proceso de azúcar crudo en la UEB Uruguay.
38. MENDOZA, J. C. D. & KULICH, E. I. 2004 Aplicación de balances de masa y energía al proceso de fermentación en estado sólido de bagazo de caña de azúcar con *Aspergillus niger*.
39. MESA, L., GONZÁLEZ, E., DE LA CRUZ, R. & LÓPEZ, Y. 2005. AVANCES EN LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO A PARTIR DE MIEL FINAL POR ASPERGILLUS NIGER
40. MORELL, I. 1984 Tecnología Azucarera.
41. MUÑOZ, A., SÁENZ, A., LÓPEZ, L., CANTÚ, L. & BARAJAS, L. 2014. Ácido Cítrico: Compuesto Interesante. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila Vol. 6.

42. PATEL, T. & PANDYA, H. 2017. CITRIC ACID PRODUCTION FERMENTATION PROCESS
43. PAVLOV, K. F. 1981. Problemas y ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química.
44. PEACOCK, S. D. 1995. Selected physical properties of sugar Factory process streams. Durban: University of Natal
45. PÉREZ, M. 2009. Evaluación del Análisis del Ciclo de Vida del Azúcar de Caña.
46. PÉREZ, M. 2016. Modelación de los inventarios parametrizados del azúcar crudo en Cuba para la evaluación ambiental con enfoque de ciclo de vida. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
47. PÉREZ, M., CONTRERAS, A. M. & ROSA, E. 2013. Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production* 41.
48. PÉREZ, O., LEY, N. & RODRÍGUEZ, K. R. 2016. Oportunidad de producción de ácido cítrico por vía fermentativa a partir de sustratos azucarados en Cuba. *Centro Azúcar*.
49. PERRY, R. H. & CHILTON, C. H. 1973. *Chemical Engineer's Handbook*.
50. PETERS, M. & TIMMERHAUS, K. 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*.
51. REIN, P. 2012. *Ingeniería de la caña de azúcar*.
52. REYES, C., LÓPEZ, L., RUBÍ, H. & RAMÍREZ, O. 2013. Desarrollo de un bioproceso industrial de la producción de ácido cítrico por *aspergillus niger*.
53. RIERADEVALL, J. 1999. *Ecodiseño de envases. El Sector de la Comida Rápida*.
54. RIVADA, F. J. 2008. PLANTA INDUSTRIAL DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO A PARTIR DE MELAZAS DE REMOLACHA: RESUMEN. UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
55. RODRÍGUEZ, B., CONTRERAS, A. M. & ROSA, E. 2014. Análisis de alternativas de mejora para la producción de azúcar en la provincia de Cienfuegos. *Revista ICIDCA, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar* 48.
56. RODRÍGUEZ, J. 2002. *La Ingeniería Ambiental entre el reto y la oportunidad*. Madrid.
57. RODRÍGUEZ, K. R. 2015. Análisis técnico-económico de alternativas para la producción de ácido cítrico por vía fermentativa a partir de sustratos azucarados. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

58. ROSAS, M. B. & TERÁN, D. F. 2015. OBTENCIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO A PARTIR DE MELAZA O CACHAZA, MEDIANTE FERMENTACIÓN UTILIZANDO CEPA DE *Aspergillus niger* ATCC 16888. UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.
59. SÁNCHEZ, O. 2004. Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus* SSP. *Revista Colombiana de Biotecnología*.
60. SAOUTER, E. & FEIJTEL, T. C. J. 2000. Use of Life Cycle Analysis and Environmental Risk Assessment in an Integrated Product Assessment, Copenhagen
61. SHAMI, E., BAKHIET, A., EHOOD, A. & AL-MOKHTAR, I. 2015. Production of Citric Acid by *Aspergillus niger* Using Sugarcane Molasses as Substrate. *Jordan Journal of Biological Sciences*, Vol. 8.
62. SMET, B., WHITE, P. R. & OWENS, J. W. 1996. Integrating life cycle assessment within an overall framework for environmental management. Curran M A, New York.
63. SOCCOL, C. R., LUCIANA, P., VANDENBERGHE, S., RODRÍGUEZ, C. & PANDEY, A. 2006. New Perspectives for Citric Acid Production and Application.
64. SORIA, M. A. 1997. Producción de ácido cítrico y desarrollo morfológico en miembros del género *Aspergillus*. Universidad de Buenos Aires.
65. SWAIN, M. R., RAY, R. C. & PATRA, J. K. 2014. CITRIC ACID: MICROBIAL PRODUCTION AND APPLICATIONS IN FOOD AND PHARMACEUTICAL INDUSTRIES.
66. TRAVERS, C., AJAY, K. & AMBIKA, P. 2015. Citric acid production by *Aspergillus niger* using different substrates *Malaysian Journal of Microbiology*, Vol. 12.
67. TREYBAL, R. 1977. Operaciones con transferencia de masa.
68. VANDENBERGHE, L. P. S., SOCCOL, C. R., PANDEY, A. & LEBault, J. M. 1999. Microbial Production of Citric Acid. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Vol. 42.
69. VELÁSQUEZ, J. A., BELTRÁN, D., PADILLA, L. & GIRALDO, G. 2010. Obtención de ácido cítrico por fermentación con *aspergillus niger* utilizando sustrato de plátano dominico hartón (musa aab simmonds) maduro.
70. VINK, E. & COLABORADORES 2003. Applications of life cycle assessment to Nature Works TM polylactide (PLA) production, *Polymer Degradation and Stability*.
71. WHITE, P. W., FRANKE, M. & HINDLE, P. 1995. Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory.)

Anexos

Anexo 1 Análisis estadístico de los parámetros de entrada (de la UEB Uruguay zafra 2019)

ID	Unidad	Valor	Distribución	Min	Máx	Comentario
RA	kg/m ²	5,27	Lognormal	2,60	1,91E+01	Rendimiento Agrícola (kg/m ²)
Ca	kg/d	1,37E+07	Normal			Caña de Azúcar (kg/d)
FCA	%	14,68	Lognormal	1,30E+01	1,68E+01	Fibra en Caña de Azúcar (%)
ETCA	%	99,39	Triangular	9,08E+01	1,12E+02	Extracción de Jugo Mezclado Total %
FB	%	48,03	Normal	4,50E+01	5,01E+01	Fibra en Bagazo (%)
AImCA	%	28,34	Normal	2,11E+01	3,60E+01	Agua de Imbibición % Caña de Azúcar (%)
BxJM	%	13,34	Normal	1,17E+01	1,49E+01	Sólidos Disueltos (Brix) en el Jugo de Proceso (Primario) (%)
CaOCA	kg/kg	6,39E-03	Normal	4,61E-03	9,62E-03	kg de CaO/kg Caña de Azúcar (kg/kg)
FICA	kg/kg	3,02E-05	Triangular	1,26E-05	3,84E-05	kg de Floculante Quimiflot 400/kg Caña de Azúcar (kg/kg)
CachCA	%	5,16	Normal	2,04	6,90	Cachaza % Caña de Azúcar (%)
BxJCl	%	14,64	Triangular	1,22E+01	1,57E+01	Sólidos Disueltos (Brix) en el Jugo Clarificado (%)

BxMe	%	58,34	Normal	3,39E+01	6,64E+01	Sólidos Disueltos (Brix) en la Meladura (%)
TJMeLL	K	302,70	Normal	2,99E+02	3,08E+02	Temperatura del Jugo de Proceso a la entrada del Calentador de Jugo Líquido-Líquido (K)
TJMsLL	K	314,98	Normal	3,11E+02	3,18E+02	Temperatura del Jugo de Proceso a la salida del Calentador de Jugo Líquido-Líquido (K)
TCCeLL	K	369,03	Normal	3,67E+02	3,71E+02	Temperatura del Condensado Contaminado a la entrada del calentador Líquido-Líquido (K)
TCCsLL	K	348,83	Normal	3,47E+02	3,51E+02	Temperatura del Condensado Contaminado a la salida del calentador Líquido-Líquido (K)
TJMsP	K	338,70	Triangular	3,35E+02	3,41E+02	Temperatura del Jugo de Proceso a la salida del

TJMsS	K	359,36				Calentador Primario (K) Temperatura del Jugo de Proceso a la salida del Calentador
TJMsT	K	375,80	Triangular	3,72E+02	3,79E+02	Secundario (K) Temperatura del Jugo de Proceso a la salida del Calentador
TJClR	K	370,07	Lognormal	3,68E+02	3,37E+02	Terciario (K) Temperatura del Jugo Clarificado a la entrada del Calentador
TJClS	K	382,16	Normal	3,74E+02	3,86E+02	Rectificador de Jugo Clarificado (K) Temperatura del Jugo Clarificado a la salida del Calentador
pv2	kPa	115,51	Lognormal			Rectificador de Jugo Clarificado (K) Presión absoluta del Vapor Vegetal procedente del Vaso 2 del Múltiple Efecto (kPa)

pvDE	kPa	162,12	Lognormal			Presión absoluta del Vapor Vegetal procedente del Vaso 1 y 2 del Doble Efecto (kPa)
pvpr	kPa	202,65	Lognormal			Presión absoluta del Vapor Vegetal de los Pre-evaporadores (kPa)
pv5	kPa	17,23				Presión absoluta del Vapor Vegetal procedente del Vaso 5 del Múltiple Efecto (kPa)
pVE	kPa	292,35				Presión absoluta del Vapor de Escape (kPa)
BxMCA	%	93,16	Triangular	9,21E+01	9,36E+01	Sólidos Disueltos de la Masa Cocida A (%)
BxMA	%	71,37	Normal	6,33E+01	7,84E+01	Sólidos Disueltos de la Miel A (%)
BxMCB	%	94,19	Lognormal	9,23E+01	9,66E+01	Sólidos Disueltos de la Masa Cocida B (%)
BxMB	%	75,77	Triangular	7,12E+01	7,84E+01	Sólidos Disueltos de la Miel B (%)
BxMCC	%	96,42	Normal	9,51E+01	9,70E+01	Sólidos Disueltos de la Masa Cocida C (%)

PzMe	%	86,24	Normal	8,03E+01	8,96E+01	Pureza de la Meladura (%)
PzMF	%	39,83	Normal	3,39E+01	4,94E+01	Pureza de la Miel Final (%)
HAC	%	0,17	Lognormal	1,30E-01	2,0E-01	Humedad del Azúcar Comercial (%)
PAF	%	99,21	Normal	9,86E+01	9,94E+01	Sacarosa (Pol) en Azúcar Físico (%)
BxMF	%	84,74	Normal	7,85E+01	8,76E+01	Sólidos Disueltos (Brix) en la Miel Final (%)
PCA	%	11,95	Normal	1,07E+01	1,33E+01	Sacarosa (Pol) en Caña de Azúcar (%)
HB	%	49,28	Lognormal	4,73E+01	5,21E+01	Humedad del Bagazo (%)
HCICA	kg/kg	5,05E-04	Normal	2,06E-04	7,70E-04	kg Ácido Clorhídrico/kg Caña de Azúcar (kg/kg)
NaOHCA	kg/kg	6,02E-04	Normal	9,81E-05	1,52E-03	kg Hidróxido de Sodio/kg Caña de Azúcar (kg/kg)
EtOHCA	m ³ /kg	7,51E-02	Normal	5,49E-02	1,13E-01	m ³ Etanol/kg Caña de Azúcar (m ³ /kg)
Na ₂ CO ₃ CA	kg/kg	4,97E-05	Lognormal	1,76E-05	9,86E-05	kg Soda ash/kg Caña de Azúcar (kg/kg)

Na ₃ PO ₄ CA	kg/kg	4,97E-05	Normal	1,76E-05	9,86E-05	kg	Fosfato trisódico/kg Caña de Azúcar (kg/kg)
RLCA	m ³ /kg	1,19E-04	Lognormal	6,69E-05	3,85E-04	Residuales Líquidos/kg	Caña de Azúcar (m ³ /kg)
IESEN	kWh/kg	7,77E-03	Lognormal	1,02E-03	1,33E-02	Índice de entrega de electricidad al SEN por cogeneración (kWh/kg)	
FoB	kg/kg	0,19	Lognormal	1,70E-01	2,10E-01	Fuel oil equivalente a Bagazo (kg/kg)	
EEGV	adim	0,81	Lognormal	7,50E-01	8,70E-01	Eficiencia energética de Generador de Vapor (%)	
pGV	kPa	2,94E+03	Lognormal			Presión del vapor directo (kPa)	
SMF	%	35,45	Triangular			Sacarosa miel final (%)	
TDAfe	K	298,00	Lognormal			Temperatura de la disolución azucarada filtrada a la entrada del intercambiador de calor (K)	
TDAfsIC	K	378,00	Normal			Temperatura de la disolución azucarada filtrada a la salida del	

			intercambiador de calor (K)
TDAfsCA	K	363,00	Temperatura de la disolución azucarada filtrada a la salida del circuito de acumulación (K)
TDAfsE	K	310,00	Temperatura de la disolución azucarada filtrada a la salida del enfriamiento (K)
TAEe	K	298,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada de la etapa de enfriamiento (K)
TAEs	K	321,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la salida de la etapa de enfriamiento (K)
TF	K	303,00	Temperatura del Fermentado (K)
TAEFe	K	298,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del fermentador (K)

TAEFs	K	308,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la salida del fermentador (K)
TLM	K	298,00	Temperatura del Licor madre a la salida de la filtración 2 (K)
TSCCa	K	323,00	Temperatura de la Suspensión de Citrato de calcio a la salida de la precipitación (K)
TAEPe	K	298,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del reactor de precipitación (K)
TAEPs	K	308,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la salida del reactor de precipitación (K)
TCCaP	K	313,00	Temperatura del Citrato de calcio precipitado a la entrada de la descomposición (K)

TEd	K	323,00	Temperatura del efluente a la salida de la descomposición (K)
TAEDe	K	298,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del reactor de descomposición (K)
TAEDs	K	308,00	Temperatura del agua de enfriamiento a la salida del reactor de descomposición (K)
TSAcC	K	313,00	Temperatura de la Solución de Ácido cítrico a la salida de la filtración 4 (K)
HAcCH	%	5,26E-02	Humedad del ácido cítrico a la entrada del secadero %
HAcCn	%	5,03E-03	Humedad del ácido cítrico a la salida del secadero %
TAiES	K	333,00	Temperatura del aire a la entrada del secadero (K)

TAiSS	K	296,00	Temperatura del aire a la salida del secadero (K)
HAiE	%	0,02	Humedad del aire a la entrada del secadero %
HAiS	%	0,03	Humedad del aire a la salida del secadero %

Anexo 2 Balances de masa y energía de la UEB Uruguay

ID	Unidad	Modelo	Valor	Comentario
AIm	kg/d	$AIm = AImCA * CA/100$	3,88E+06	Agua de Imbibición consumida en la extracción de jugo (kg/c)
Bp	kg/d	$Bp = 0,98 * CA * FCA/FB$	4,10E+06	Bagazo Producido (kg/c)
JM	kg/d	$JM = 0,87 * (CA + AIm - Bp)$	1,17E+07	Jugo Mezclado (kg/c)
CpJMLL	kJ/kgK	$CpJMLL = 2,92 - 4,31E - 02 * BxJM + 6,7E - 05 * BxJM * TJMeLL + 6,93E - 03 * TJMeLL - 9,27E - 06 * TJMeLL^2$	3,86	Calor específico del Jugo Mezclado a la entrada del Calentador Líquido-Líquido (kJ/kgK)
CCLL	kg/d	$CCLL = 0,24 * JM * CpJMLL * (TJMsLL - TJMeLL) / (TCCeLL - TCCsLL)$	6,60E+06	Condensado Contaminado empleado como medio de calentamiento en el Calentador Líquido - Líquido (kg/c)
Tv2	K	$Tv2 = (45,97 + (3816,44 / (18,30 - \ln(7,5 * pv2))))$	376,81	Temperatura de saturación del vapor vegetal del Vaso2del Múltiple Efecto (K)
h2	kJ/kg	$h2 = 2823,90 - 0,37 * Tv2 - 3,08E - 03 * Tv2^2$	2,25E+03	Calor latente de vaporización del vapor vegetal del Vaso 2 del Múltiple Efecto (kJ/kg)
CpJMP	kJ/kgK	$CpJMP = 2.92 - 0,0431 * BxJM + 0,000067 * BxJM * TJMsLL + 0,00693 * TJMsLL - 0,0000092 * TJMsLL^2$	3,90	Calor específico del Jugo Mezclado a la entrada del Calentador Primario (kJ/kgK)
VcP	kg/d	$VcP = JM * CpJMP * (TJMsP - TJMsLL) * 1.05/h2$	5,06E+05	Vapor Vegetal consumido en el

CpJMS	kJ/kgK	$CpJMS = 2.92 - 4.31E - 02$ $* BxJM + 6.70E$ $- 05 * BxJM$ $* TJMsP + 6.93E$ $- 03 * TJMsP$ $- 9.27E - 06$ $* TJMsP^2$	3,93	Calentador Primario (kg/c) Calor específico del Jugo para Proceso a la entrada del Calentador Secundario (kJ/kgK)
TvDE	K	$TvDE = (45.97)$ $+ (3816.44$ $/(18.30 - \ln(7.5$ $* pvDE)))$	386,82	Temperatura de saturación del vapor vegetal de los vasos 1 y 2 del Doble Efecto (K)
hDE	kJ/kg	$hDE = 2823.9 - 0.37 * TvDE$ $- 3.08E - 03$ $* TvDE^2$	2,22E+03	Calor latente de vaporización del vapor vegetal de los vasos 1 y 2 del Doble Efecto (kJ/kg)
VcS	kg/d	$VcS = JM * CpJMS$ $* (TJMsS$ $- TJMsP) * \frac{1.05}{hDE}$	4,50E+05	Vapor Vegetal consumido en el Calentador Secundario (kg/c)
CpJMT	kJ/kgK	$CpJMT = 2,92 - (4,31E - 02$ $* BxJM) + (6,70E$ $- 05 * BxJM$ $* TJMsS)$ $+ (6,93E - 03$ $* TJMsS)$ $- (9,27E - 06$ $* TJMsS^2)$	3,96	Calor específico del Jugo Mezclado a la entrada del Calentador Terciario (kJ/kgK)
Tvpr	K	$Tvpr = (45.97)$ $+ (3816.44$ $/(18.30 - \ln(7.5$ $* pvpr)))$	393,75	Temperatura de saturación del vapor vegetal de los pre-evaporadores (K)
hpr	kJ/kg	$hpr = 2823.9 - 0.37 * Tvpr$ $- 3.08E - 03$ $* Tvpr^2$	2,20E+03	Calor latente de vaporización del vapor vegetal de los pre-evaporadores (kJ/kg)
VcT	kg/d	$VcT = 1,05 * JM * CpJMT$ $* (TJMsT$ $- TJMsS)/hpr$	3,64E+05	Vapor Vegetal Consumido en el Calentador Terciario (kg/c)
CCP	kg/d	$CCP = VcP$	5,06E+05	Condensado Contaminado del

CCS	kg/d	$CCS = VcS$	4,50E+05	Calentador Primario (kg/c) Condensado Contaminado del Calentador Secundario (kg/c)
CCT	kg/d	$CCT = VcT$	3,64E+05	Condensado Contaminado del Calentador Terciario (kg/c)
H3PO4	kg/d	$H3PO4 = 2E - 04 * JM$	2,34E+03	Ácido fosfórico utilizado para facilitar la clarificación (kg/c)
Ca(OH)2	kg/d	$Ca(OH)2 = 28.57 * CaOCA * CA$	2,50E+06	Lechada de cal para clarificación (kg/c)
ACa(OH)2	kg/d	$ACa(OH)2 = 3.5E - 02 * CA$	4,79E+05	Agua para preparar la Lechada de Cal (kg/c)
Fl	kg/d	$Fl = FlCA * CA$	4,13E+02	Floculante Quimiflot 400 (kg/c)
Cach	kg/d	$Cach = CachCA * CA/100$	7,07E+05	Cachaza (kg/c)
Alf	kg/d	$Alf = 5E - 02 * CA$	6,84E+05	Agua de lavado consumida en los filtros (kg/c)
Bf	kg/d	$Bf = 6E - 03 * CA$	8,21E+04	Bagazo consumido como medio filtrante en la Etapa de Filtración (kg/c)
JF	kg/d	$JF = 0,15JM$	1,76E+06	Jugo Filtrado
CachU	kg/d	$CachU = 3.60E - 02 * Cach$	2,54E+04	Cachaza equivalente a Urea (kg/c)
CachST	kg/d	$CachST = 2.90E - 02 * Cach$	2,05E+04	Cachaza equivalente a Superfosfato Triple (kg/c)
CachCP	kg/d	$CachCP = 3,16E - 03 * CachCA$	1,63E-02	Cachaza equivalente a Cloruro de Potasio (kg/c)
L	kg/d	$L = JF + Cach - Alf - Bf$	1,70E+06	Lodo del Clarificador (kg/c)

JCl	kg/d	$JCl = JM + Bf + Fl + H3PO4 + Ca(OH)2 + Alf - JF - Cach$	1,25E+07	Jugo Clarificado (kg/c)
CpJClR	kJ/kgK	$CpJClR = 2,92 - 4,31E - 02 * BxJCl + 6,7E - 05 * BxJCl * TJClR + 6,93E - 03 * TJClR - 9,27E - 06 * TJClR^2$	3,95E+00	Calor específico del Jugo Clarificado a la entrada del Calentador Rectificador de Jugo Clarificado (kJ/kgK)
TVE	K	$TVE = 45,97 + (3816,44 / (18,30 - \ln(7,5 * pVE)))$	405,77	Temperatura de saturación del Vapor de Escape (K)
hVE	kJ/kg	$hVE = 2823,90 - 0,37 * TVE - 3,08E - 03 * TVE^2$	2,17E+03	Calor latente de vaporización del Vapor de Escape (kJ/kg)
VEcR	kg/d	$VEcR = 1,05 * JCl * CpJClR * (TJClR - TJClR) / hVE$	2,89E+05	Vapor de Escape Consumido en el Calentador Rectificador de Jugo Clarificado (kg/c)
CCR	kg/d	$CCR = VEcR$	2,89E+05	Condensado Contaminado del Calentador Rectificador (kg/c)
ET	kg/d	$ET = JCl * (1 - (BxJCl / BxMe))$	9,38E+06	Evaporación Total en la etapa de evaporación (kg/c)
Me	kg/d	$Me = JCl * BxJCl / BxMe$	3,14E+06	Meladura (kg/c)
CpJClR	kJ/kgK	$CpJClR = 2,9241 - (4,31E - 02 * BxJCl) + ((6,7E - 05) * BxJCl * TJClR) + ((6,93 - E03) * TJClR) - ((9,27E - 06) * (TJClR^2))$	3,96	Calor específico del Jugo Clarificado a la salida del Calentador Rectificador de Jugo Clarificado (kJ/kgK)
TeJPre	K	$TeJPre = tvpre + \Delta tb + \Delta th$	392,72	Temperatura de salida del jugo de los pre-evaporadores
AEMiTaA	kg/d	$AEMiTaA = 28724,50 * (1 - (90 / BxMCA))$	9,74E+02	Agua evaporada en el material inicial (pie de templa) del Tacho A (kg/c)

MeTaA	kg/d	$MeTaA = (28724,50 - AEMiTaA) * (BxMe/BxMCA)$	1,74E+04	Meladura alimentada al Tacho A (kg/c)
AEMe	kg/d	$AEMe = MeTaA * (1 - (BxMe / BxMCA))$	6,50E+03	Agua evaporada en la meladura alimentada al Tacho A (kg/c)
VTaA	kg/d	$VTaA = 1,47 * (AEMiTaA + AEMe)$	1,10E+04	Consumo de Vapor Vegetal en los Tachos que se elabora MCA (kg/c)
AEMiTaB	kg/d	$AEMiTaB = 28724,50 * (1 - (90/BxMCB))$	1,28E+03	Agua evaporada en el material inicial (pie de templa) del Tacho B (kg/c)
MA	kg/d	$MA = (20517,5 - AEMiTaB) * (BxMA / BxMCB)$	1,46E+04	Miel A alimentada al Tacho B (kg/c)
AEMA	kg/d	$AEMA = MA * (1 - (BxMA / BxMCB))$	3,53E+03	Agua evaporada en la Miel A alimentada al Tacho B (kg/c)
VTaB	kg/d	$VTaB = 2,4 * (AEMiTaB + AEMA)$	1,15E+04	Consumo de Vapor Vegetal en los Tachos que se elabora MCB (kg/c)
AEMiTaC	kg/d	$AEMiTaC = 28724,50 * (1 - (90/BxMCC))$	1,91E+03	Agua evaporada en el material inicial (pie de templa) del Tacho C (kg/c)
MB	kg/d	$MB = (28724,5 - AEMiTaC) * (BxMB / BxMCC)$	2,11E+04	Miel B alimentada al tacho C (kg/c)
AEMB	kg/d	$AEMB = MB * (1 - (BxMB / BxMCC))$	4,51E+03	Agua evaporada en la Miel B alimentada al Tacho C (kg/c)
VTaC	kg/d	$VTaC = 1,44 * (AEMiTaC + AEMB)$	9,25E+03	Consumo de Vapor Vegetal en los Tachos que se elabora MCC (kg/c)
VTa	kg/d	$VTa = VTaA + VTaB + VTaC$	3,18E+04	Consumo de Vapor Vegetal en Tachos (kg/c)
CNCTa	kg/d	$CNCTa = VTa$	3,18E+04	Condensado no contaminado de los Tachos (kg/c)

Tv5	K	$Tv5 = (45.97) + (3816.44 / (18.30 - \ln(7.5 * pv5)))$	329,96	Temperatura de saturación del vapor vegetal de vaso 5 del múltiple efecto (K)
h5	kJ/kg	$h5 = 2823,90 - 0,37 * Tv5 - 3,08E - 03 * Tv5^2$	2,37E+03	Calor latente de vaporización del Vapor de Escape consumido en el Calentador Rectificador de Jugo Clarificado (kJ/kg)
VEpr	kg/d	$VEpr = 1,05 * ((JCl * CpJCl * (TeJ5 - TJClSR)) + (VcT * hpr) + ((VcS + VTa) * hDE) + (VcP * h2) + (Ev * h5)) / hVE$	3,27E+05	Vapor de escape consumido en el pre-evaporador (kg/c)
CNCpr	kg/d	$CNCpr = VEpr$	3,27E+05	Condensado no contaminado de los pre evaporadores
CNCDE	kg/d	$CNCDE = VvDE$	4,15E+03	Consumo del vapor vegetal del doble efecto
CNCV1	kg/d	$CNCV1 = VprQE$	9,04E+03	Condensado no contaminado vaso 1 QE
CNCV2	kg/d	$CNCV2 = VV1$	2,10E+03	Condensado no contaminado vaso 2 QE
CC3	kg/d	$CC3 = VV2$	1,53E+03	Condensado contaminado vaso 3
CC4	kg/d	$CC4 = VV3$	1,44E+03	Condensado contaminado vaso 3
CC5	kg/d	$CC5 = VV4$	1,30E+03	Condensado contaminado vaso 4
VE	kg/d	$VE = 1,05 * (VEcR + VEpr + 8,5E - 02 * CA + VcE)$	1,97E+06	Vapor generado para suplir necesidades de Vapor de Escape en el proceso incluyendo la evaporación en la producción de ácido cítrico (kg/c)
H20gv	kg/d	$H20gv = 1,20 * VE$	2,36E+06	Agua consumida en generación de vapor directo (kg/c)

TVG	K	$TVG = 45,97 + (3816,44 / (18,30 - \ln(7,5 * pVG)))$	505,81	Temperatura del vapor generado (K)
hVG	kJ/kg	$hVG = 1470,10 + (3,60 * TVG) - ((1,36E - 03) * (TVG^2)) - (0,12 * pVG) - ((4,56E - 07) * (pVG^2)) + ((1,51E - 04) * pVG * TVG)$	2810,95	Calor latente de vaporización del Vapor directo (kJ/kg)
Bc	kg/d	$Bc = (VE * (hVG - 336,33) / (17807,50 - 203,22 * HB)) * EEGV$	5,08E+05	Bagazo combustible (kg/c)
Bd	kg/d	$Bd = Bp - Bf - Bc$	3,51E+06	Bagazo disponible (kg/c)
Ai	kg/d	$Ai = 8,66 * Bc * (1 - 0,01 * HB)$	2,23E+06	Aire consumido en generación de vapor (kg/c)
HCl	kg/d	$HCl = HClCA * CA$	6,91E+03	Ácido Clorhídrico (kg/c)
NaOH	kg/d	$NaOH = NaOHCA * CA$	8,23E+03	Hidróxido de sodio (kg/kg)
Na2CO3	kg/d	$Na2CO3 = Na2CO3CA * CA$	6,80E+02	Carbonato de Sodio (Soda Ash) (kg/c)
Na3PO4	kg/d	$Na3PO4 = Na3PO4CA * CA$	6,80E+02	Fosfato Trisódico (kg/c)
AP	kg/d	$AP = 5,92E - 06 * CA$	81,03	Azúcar en Polvo (kg/c)
H2Op	kg/d	$H2Op = Alm + ACa(OH)2 + ALf + ADM + ACe$	5,26E+06	Agua consumida en el proceso (kg/c)
ADM	kg/d	$ADM = 1,50E - 03 * Me * (100 - BxMe)$	1,96E+05	Agua para dilución de Miel (kg/c)
ACe	kg/d	$ACe = 0.1 * AC96$	1,72E+04	Agua consumida en las centrifugas (kg/c)
AC96	kg/d	$AC96 = 1,01E - 04 * CA * EPCA * BxJM * PAF * (PzMe - PzMF) / ((99 - PzMF) * (100 - HAC))$	1,72E+05	Azúcar Comercial Base 96 (kg/c)

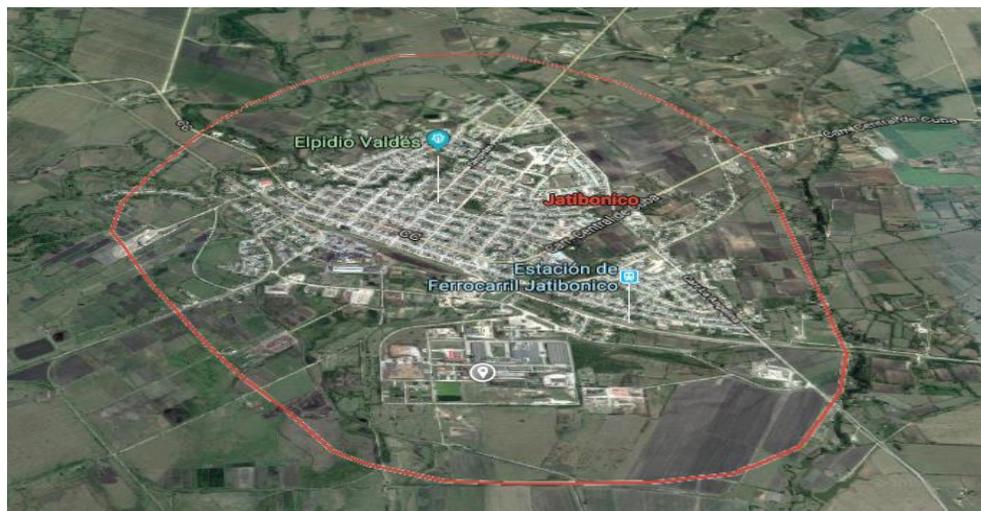
ExC	kg/d	$ExC = CCLL + CCP + CCS + CCT + CCR + CNCTa + CNCpr + CNCDE + CNCV1 + CNCV2 + CC3 + CC4 + CC5 + E - H2Op - H2Ogv$	9,72E+05	Excedente de condensados o agua de reposición para suplir las necesidades del proceso (kg/c)
MF	kg/d	$MF = 9,7E - 03 * CA * ETCA * BxJM * (99 - PzMe) / (BxMF * (99 - PzMF))$	4,48E+05	Miel Final (C) (kg/c)
RLSI	kg/d	$RLSI = 997 * RLCA * CA$	1,62E+06	Residuales Líquidos generados en el subsistema industrial (kg/c)
RLU	kg/d	$RLU = 0,11 * RLSI$	1,78E+05	Residuales Líquidos equivalente a Urea (kg/c)
RLST	kg/d	$RLST = 0,16 * RLSI$	2,59E+05	Residuales Líquidos equivalente a Superfosfato Triple (kg/c)
ESEN	kWh/d	$ESEN = IESEN * CA$	1,06E+05	Electricidad Entregada al Sistema Electroenergético Nacional equivalente a electricidad generada a partir de fuel oil (kWh/d)
BdFo	kg/d	$BdFo = FoB * Bd$	6,58E+05	Bagazo disponible equivalente a fuel oil (kg/c)
Ce	kg/d	$Ce = 4,17E - 02 * Bc$	2,12E+04	Cenizas de la combustión del bagazo (kg/c)
CeST	kg/d	$CeST = 1,52E - 02 * Ce$	3,22E+02	Cenizas de la combustión del bagazo equivalente a Superfosfato Triple (kg/c)
CeCP	kg/d	$CeCP = 1,34E - 02 * Ce$	2,84E+02	Cenizas de la combustión del bagazo equivalente a

H2Og	kg/d	$H2Og = (0,77 + 2,3E - 03 * HB) * Bc$	4,49E+05	Cloruro de Potasio (kg/c) Vapor de agua en los gases de combustión del bagazo (kg/c)
O2	kg/d	$O2 = 6,65E - 03 * (100 - HB) * Bc$	1,71E+05	Oxígeno en los gases de combustión del bagazo (kg/c)
Ar	kg/d	$Ar = 1,10E - 03 * (100 - HB) * Bc$	2,84E+04	Argón en los gases de combustión del bagazo (kg/c)
N2	kg/d	$N2 = 6,48E - 02 * (100 - HB) * Bc$	1,67E+06	Nitrógeno en los gases de combustión del bagazo (kg/c)
NOxSI	kg/d	$NOxSI = 9E - 04 * Bc$	4,57E+02	Óxidos de Nitrógeno en los gases de combustión del bagazo (kg/c)
COSI	kg/d	$COSI = 9E - 04 * Bc$	4,57E+02	Monóxido de carbono en los gases de combustión de bagazo (kg/c)
MOP	kg/d	$MOP = 1E - 06 * Bc$	5,08E-01	Materia orgánica policíclica en los gases de combustión del bagazo (kg/c)
MPSI	kg/d	$MPSI = 7,08E - 03 * Bc$	3,60E+03	Material Particulado > 2.5 y < 10 Micrómetros emitidos al aire en los gases de combustión del bagazo (kg/c)
SO2	kg/d	$SO2 = 4E - 04 * Bc$	2,03E+02	Dióxido de azufre en los gases de combustión del bagazo (kg/c)

Anexo 3 Miel a comprar para suplir las necesidades de materia prima

	Uruguay (kg/c)	Uruguay (kg/a) 49 ciclos	Capacidad Potencial (Demanda) (kg/a)	Capacidad Potencial (kg/c)
Ácido Cítrico	6,86E+04	3,36E+06	5,00E+06	1,02E+05
Miel Final	3,01E+05	1,48E+07	2,20E+07	4,48E+05
Miel Final a comprar para suplir necesidades de la materia prima			7,20E+06	

Anexo 4 Jatibonico, Sancti Spíritus



Anexo 6 Resultados caracterizados por categorías de impactos⁽¹⁾

CI ⁽²⁾		U ⁽³⁾	T ⁽⁴⁾	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	kg CO ₂ eq	37,21	0,00	27,80	1,170	21,96	8,34E-03	1,59E-02	4,09E-02	2,25E-03	1,94E-02	2,56E-03	4,99E-04	3,57E-04	
		1,6	0,00	1,95E-04	2,03E-09	2,08E-06	6,36E-08	2,82E-09	1,36E-08	9,55E-10	5,31E-09	4,54E-10	3,80E-10	2,23E-10	
III	kBq Co-60 eq	8,84E-02	0,00	7,49E-02	1,31E-04	0,40	4,27E-04	2,93E-04	4,66E-03	1,76E-04	8,15E-04	4,72E-05	2,94E-05	1,80E-04	
		1,28E-04	4,48E-03	6,46E-03	3,94E-05	1,21E-02	1,88E-05	1,13E-05	1,09E-06	6,04E-06	4,34E-05	1,82E-06	1,09E-06	8,95E-07	
V	kg PM2.5 eq	3,98E-03	1,07E-03	8,46E-03	1,55E-05	5,79E-03	1,70E-05	1,05E-05	7,63E-05	6,28E-06	5,19E-05	1,69E-06	8,09E-07	8,31E-07	
		4,09E-04	4,48E-03	6,55E-03	4,02E-05	1,25E-02	1,90E-05	1,17E-05	1,75E-06	6,12E-06	4,42E-05	1,88E-06	1,12E-06	9,05E-07	
VI I	kg SO ₂ eq	1,41E-02	3,61E-03	5,66E-02	4,78E-05	1,61E-02	4,29E-05	3,38E-05	2,43E-04	2,29E-05	1,46E-04	5,45E-06	1,77E-06	1,66E-06	
		6,79E-04	0,00	2,10E-03	1,81E-06	2,87E-04	3,24E-06	1,62E-08	3,63E-08	1,65E-06	1,53E-05	2,61E-09	1,53E-07	3,61E-07	

IX	kg N eq	7,0	0,00	7,82	7,10	3,47	2,8	4,52	1,33	9,84	5,46	7,29	1,62	2,61
		2E-02					5E-07							
X	kg DCB	-	0,00	8,83	4,60	3,05	2,8	2,71	2,77	1,96	0,10	4,36	1,24	3,84
		20,30					7E-02							
XI	kg DCB	-	0,00	9,99	9,78	2,63	2,9	8,18	3,64	1,62	1,17	1,32	1,18	1,37
		3,47E-02					4E-04							
XI I	kg DCB	-	0,00	2,41	1,60	3,90	4,2	7,86	2,04	2,34	1,71	1,27	1,69	1,86
		0,18					2E-04							
XI II	kg DCB	-	0,00	2,68	6,47	4,10	5,7	7,95	1,40	1,51	7,38	1,28	1,50	2,17
		0,13					3E-04							
XI V	kg DCB	-	0,00	13,49	1,47	0,74	8,6	9,68	7,10	5,56	2,90	1,56	3,53	3,18
		16,59					3E-03							
X V	m ² a crop eq	-	0,00	18,19	0,00	0,30	2,3	0,00	0,00	2,77	2,87	0,00	1,43	1,48
		16,15					2E-04							
X VI	kg Cu eq	-	0,00	6,89	9,44	2,98	1,4	1,41	1,54	2,05	5,94	2,28	1,06	5,65
		2,37E-02					0E-04							
X VI I	kg oil eq	-	0,00	0,66	6,31	2,00	1,9	6,54	7,52	5,37	4,81	1,05	1,65	9,34
		7,17					8E-03							

X						1,7							
VI	0,3	3,50		1,82	2,91		3,35	2,01	1,15	1,15	5,41	1,69	5,78
I	8	E-02	0,74	E-05	E-02	5E-	E-05	E-04	E-04	E-03	E-06	E-05	E-06
I	m³					04							

⁽¹⁾Flujos del ICV se muestran en el Anexo 6

⁽²⁾Categorías de impacto: **I.** Calentamiento global, **II.** Agotamiento del ozono estratosférico, **III.** Radiación ionizante, **IV.** Formación de ozono, Salud Humana, **V.** Formación de material particulado fino, **VI.** Formación de ozono, Ecosistema Terrestre, **VII.** Acidificación terrestre, **VIII.** Eutrofización del agua dulce, **IX.** Eutrofización marina, **X.** Ecotoxicidad terrestre, **XI.** Ecotoxicidad del agua dulce, **XII.** Ecotoxicidad marina, **XIII.** Toxicidad carcinogénica humana, **XIV.** Toxicidad no carcinogénica humana, **XV.** Uso del suelo, **XVI.** Disminución de recursos minerales, **XVII.** Disminución de recursos fósiles, **XVIII.** Consumo de agua

⁽³⁾Unidad, ⁽⁴⁾Total

...Anexo 6 continuación

CI	U ⁽³⁾	T ⁽⁴⁾	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I	kg CO ₂	37,21	5,62	8,25	8,31					-			-	
	eq		E-03	E-03	E-02	-0,10	-3,19	-5,71	-2,09	8,49	-0,38	-0,12	3,48	-1,15
II	kg	1,67	3,25	3,35	2,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CFC11		E-09	E-09	E-08	1,67	1,92	2,25	4,92	8,22	8,80	2,78	9,03	8,25
III	eq	E-04				E-08	E-05	E-06	E-06	E-10	E-08	E-06	E-09	E-07
	kBq	-	2,24	5,39	1,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	Co-60	8,84	E-03	E-04	E-03	8,64	1,04	-0,27	-0,22	4,64	4,80	5,91	1,60	1,48
	eq		E-02			E-04	E-02			E-05	E-02	E-03	E-04	E-02
V	kg	1,28	1,32	1,94	1,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NOx eq		E-04	E-05	E-05	E-05	3,05	2,36	6,74	9,10	2,54	3,58	3,96	4,04
VI	kg	3,98	1,26	2,20	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PM2.5		E-03	E-05	E-05	E-04	1,14	1,57	8,79	6,03	1,68	2,85	3,64	4,88
VII	eq	E-03				E-04	E-03	E-03	E-03	E-06	E-04	E-04	E-06	E-03
	kg	4,09	1,34	1,99	2,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx eq	E-04		E-05	E-05	E-05	3,11	2,40	6,95	9,78	2,59	3,65	4,02	6,50	3,88
VIII	kg SO ₂	1,41	3,15	6,17	3,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	eq		E-02	E-05	E-05	E-04	3,47	7,85	2,67	1,75	4,07	7,41	2,28	1,37
IX	kg P eq	6,79	7,56	3,57	2,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	eq		E-04	E-06	E-06	E-07	9,89	2,37	1,07	2,25	9,60	1,41	3,97	1,51
X	kg N eq	7,02	4,84	2,21	1,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	eq		E-02	E-07	E-07	E-06	4,19	7,15	2,14	2,00	5,73	2,56	6,95	8,37
						E-07	E-03	E-04	E-05	E-08	E-05	E-04	E-08	E-06

X	kg 1,4-	-	6,89			-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DCB	20,30	E-02	7,49	0,10	2,68	-1,29	29,9	-1,70	9,43	-2,73	1,50	3,36	-4,13
						E-02		9		E-03		E-01	E-04	
XI	kg 1,4-	-	7,30	8,09	1,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DCB	3,47	E-04	E-04	E-05	6,70	9,26	-0,12	2,01	9,15	1,14	1,61	1,39	2,31
		E-02				E-06	E-03		E-02	E-05	E-02	E-03	E-07	E-03
XI	kg 1,4-	-	1,04	7,04	3,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DCB	-0,18	E-03	E-03	E-04	9,66	3,22	-0,19	3,68	1,31	1,58	2,26	1,19	6,30
I						E-05	E-03		E-02	E-04	E-02	E-03	E-06	E-03
XI	kg 1,4-	-	6,52	4,16	3,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DCB	-0,13	E-04	E-04	E-05	5,75	1,32	-0,12	4,61	8,56	1,14	2,13	2,61	6,13
II						E-05	E-03		E-02	E-05	E-02	E-03	E-07	E-03
XI	kg 1,4-	-	2,38	0,47	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DCB	16,59	E-02		E-03	1,05	1,21	-4,07	-0,65	3,07	-0,35	-0,42	1,40	8,55
V						E-03				E-03			E-05	E-02
X	m ² a	-	3,96	2,22		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	crop eq	16,15	E-04	E-04	0,00	0,00	-1,65	6,16	2,37	8,61	8,74	-0,59	0,00	2,05
V								E-02	E-02	E-05	E-03			E-03
X	kg Cu	-	8,81	5,79	1,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	eq	2,37	E-05	E-05	E-05	7,26	9,78	1,76	4,09	1,19	1,21	3,23	3,66	3,43
VI		E-02				E-03	E-04	E-02	E-03	E-05	E-03	E-04	E-03	E-04
X	kg oil	-	1,43	3,45	9,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	eq	-7,17	E-03	E-03	E-02	4,78	-0,29	-2,36	-6,82	2,78	6,83	1,19	7,10	-0,37
I						E-02				E-04	E-02	E-02	E-04	
X	m ³	-	8,37	1,96	9,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,38	E-05	E-04	E-05	1,31	6,81	-0,32	3,20	2,91	2,71	5,01	3,77	2,95
I						E-04	E-02		E-02	E-05	E-03	E-03	E-06	E-03

⁽¹⁾Flujos del ICV se muestran en el Anexo 6.1

⁽²⁾Categoría de impacto: **I.** Calentamiento global, **II.** Agotamiento del ozono estratosférico, **III.** Radiación ionizante, **IV.** Formación de ozono, Salud Humana, **V.** Formación de material particulado fino, **VI.** Formación de ozono, Ecosistema Terrestre, **VII.** Acidificación terrestre, **VIII.** Eutrofización del agua dulce, **IX.** Eutrofización marina, **X.** Ecotoxicidad terrestre, **XI.** Ecotoxicidad del agua dulce, **XII.** Ecotoxicidad marina, **XIII.** Toxicidad

carcinogénica humana, **XIV.** Toxicidad no carcinogénica humana, **XV.** Uso del suelo, **XVI.** Disminución de recursos minerales, **XVII.** Disminución de recursos fósiles, **XVIII.** Consumo de agua

⁽³⁾Unidad, ⁽⁴⁾Total

Anexo 7 Flujos del ICV**No. Flujo del ICV**

-
- 1 Ácido cítrico anhidro a partir de miel final (kg)
 - 2 Caña de azúcar (kg)
 - 3 Ácido fosfórico utilizado para facilitar la clarificación (kg)
 - 4 Lechada de cal requerida en el ciclo de vida del ácido cítrico (kg)
 - 5 Floculante empleado en la clarificación del jugo mezclado (kg)
 - 6 Ácido clorhídrico empleado en la limpieza de los equipos de transferencia de calor (kg)
 - 7 Hidróxido de sodio empleado en la limpieza de los equipos de transferencia de calor (kg)
 - 8 Carbonato de sodio (Soda ash) empleada en tratamiento de agua para generador de vapor (kg)
 - 9 Fosfato trisódico empleado en tratamiento de agua para generador de vapor (kg)
 - 10 Sulfato de potasio como nutriente para la fermentación (kg)
 - 11 Cloruro de amonio como nutriente para la fermentación (kg)
 - 12 Sulfato de magnesio como nutriente para la fermentación (kg)
 - 13 Sulfato de hierro como nutriente para la fermentación (kg)
 - 14 Sulfato de cinc como nutriente para la fermentación (kg)
 - 15 Ácido sulfúrico empleado en la descomposición (kg)
 - 16 Cachaza equivalente a Superfosfato triple (kg)
 - 17 Azúcar Comercial Base 96 producto (kg)
 - 18 Residuales líquidos equivalente a Urea (kg)
 - 19 Bagazo disponible equivalente a petróleo (kg)
 - 20 Cenizas de la combustión del bagazo equivalente a cloruro de potasio (kg)
 - 21 Dióxido de carbono producido en la fermentación (kg)
 - 22 Micelio separado del licor madre en de la filtración del fermentado (kg)
 - 23 Yeso (sulfato de calcio) (kg)
 - 24 Electricidad Entregada al Sistema Electroenergético Nacional (kWh)
-

Anexo 8 Resultados normalizados por categorías de impactos⁽⁵⁾

CI ⁽⁶⁾	T ⁽⁷⁾	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	4,66E		3,48E	1,46E	2,75E	1,04E	1,99E	5,12E	2,82E	2,42E	3,21E	6,25E	4,47E
	-03	0,00	-03	-06	-03	-06	-06	-06	-07	-06	-07	-08	-08
II	2,79E		3,25E	3,39E	3,47E	1,06E	4,71E	2,26E	1,60E	8,87E	7,59E	6,35E	3,73E
	-03	0,00	-03	-08	-05	-06	-08	-07	-08	-08	-09	-09	-09
III	1,84E		1,56E	2,72E	8,40E	8,88E	6,08E	9,69E	3,66E	1,69E	9,81E	6,12E	3,74E
	-04	0,00	-04	-07	-04	-07	-07	-06	-07	-06	-08	-08	-07
IV	6,20E	2,18E	3,14E	1,92E	5,89E	9,13E	5,50E	5,28E	2,94E	2,11E	8,87E	5,28E	4,35E
	-06	-04	-04	-06	-04	-07	-07	-08	-07	-06	-08	-08	-08
V	1,56E	4,19E	3,31E	6,07E	2,26E	6,65E	4,09E	2,98E	2,45E	2,03E	6,60E	3,16E	3,25E
	-04	-05	-04	-07	-04	-07	-07	-06	-07	-06	-08	-08	-08
VI	2,30E	2,52E	3,68E	2,27E	7,01E	1,07E	6,58E	9,85E	3,45E	2,49E	1,06E	6,28E	5,09E
	-05	-04	-04	-06	-04	-06	-07	-08	-07	-06	-07	-08	-08
VI	3,43E	8,80E	1,38E	1,17E	3,94E	1,05E	8,24E	5,94E	5,60E	3,57E	1,33E	4,32E	4,06E
	-04	-05	-03	-06	-04	-06	-07	-06	-07	-06	-07	-08	-08
VI	1,05E		3,24E	2,79E	4,42E	4,98E	2,49E	5,59E	2,54E	2,35E	4,02E	2,36E	5,56E
	-03	0,00	-03	-06	-04	-06	-08	-08	-06	-05	-09	-07	-07
IX	1,52E		1,70E	1,54E	7,52E	6,18E	9,81E	2,89E	2,13E	1,18E	1,58E	3,52E	5,67E
	-02	0,00	-02	-08	-06	-08	-09	-08	-08	-07	-09	-08	-09
X	1,96E		8,52E	4,44E	2,94E	2,77E	2,61E	2,68E	1,89E	9,93E	4,21E	1,20E	3,71E
	-02	0,00	-03	-06	-03	-05	-06	-05	-05	-05	-07	-06	-07
XI	2,83E		8,14E	7,97E	2,14E	2,40E	6,66E	2,96E	1,32E	9,50E	1,07E	9,65E	1,12E
	-02	0,00	-02	-07	-02	-04	-07	-06	-04	-04	-07	-06	-05

XI			2,34E	1,55E	3,78E	4,08E	7,61E	1,97E	2,27E	1,65E	1,23E	1,63E	1,80E
I	-0,18	0,00	-02	-05	-02	-04	-06	-05	-04	-03	-06	-05	-05
XI	-												
II	4,76E		9,68E	2,33E	1,48E	2,07E	2,87E	5,04E	5,47E	2,67E	4,63E	5,43E	7,82E
II	-02	0,00	-04	-06	-02	-04	-06	-06	-05	-03	-07	-06	-06
XI	-												
V			9,06E	9,89E	4,94E	5,79E	6,50E	4,77E	3,73E	1,94E	1,05E	2,37E	2,13E
V	-0,11	0,00	-02	-07	-03	-05	-07	-06	-05	-04	-07	-06	-06
XV	2,62E		2,95E		4,78E	3,76E	0,00E	0,00E	4,49E	4,65E		2,32E	2,40E
XV	-03	0,00	-03	0,00	-05	-08	+00	+00	-08	-07	0,00	-09	-09
XV	-												
I	1,98E		5,74E	7,86E	2,49E	1,16E	1,18E	1,28E	1,71E	4,95E	1,90E	8,87E	4,71E
I	-07	0,00	-08	-09	-08	-09	-11	-11	-10	-09	-12	-12	-12
XV	-												
II	7,31E		6,78E	6,44E	2,04E	2,02E	6,67E	7,67E	5,47E	4,91E	1,08E	1,69E	9,53E
II	-03	0,00	-04	-06	-03	-06	-06	-06	-07	-06	-06	-07	-08
XV	1,41E	1,31E	2,79E	6,84E	1,09E	6,56E	1,26E	7,52E	4,30E	4,31E	2,03E	6,35E	2,17E
II	-03	-04	-03	-08	-04	-07	-07	-07	-07	-06	-08	-08	-08

⁵⁾Flujos del ICV se muestran en el Anexo 6

⁶⁾Categoría de impacto: **I.** Calentamiento global, **II.** Agotamiento del ozono estratosférico, **III.** Radiación ionizante, **IV.** Formación de ozono, Salud Humana, **V.** Formación de material particulado fino, **VI.** Formación de ozono, Ecosistema Terrestre, **VII.** Acidificación terrestre, **VIII.** Eutrofización del agua dulce, **IX.** Eutrofización marina, **X.** Ecotoxicidad terrestre, **XI.** Ecotoxicidad del agua dulce, **XII.** Ecotoxicidad marina, **XIII.** Toxicidad carcinogénica humana, **XIV.** Toxicidad no carcinogénica humana, **XV.** Uso del suelo, **XVI.** Disminución de recursos minerales, **XVII.** Disminución de recursos fósiles, **XVIII.** Consumo de agua

⁷⁾Total

Anexo 9 continuación Anexo 8

CI ⁽⁶⁾	T ⁽⁷⁾	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I	7,04	1,03	1,04	1,29E	4,00E	7,15E	2,62E	1,06E	4,73E	1,46E	4,35E	1,44E	7,04
	E-07	E-06	E-05	-05	-04	-04	-04	-07	-05	-05	-07	-04	E-07
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II	5,43	5,60	3,44	2,79E	3,21E	3,75E	8,21E	1,37E	1,47E	4,64E	1,51E	1,38E	5,43
	E-08	E-08	E-07	-07	-04	-05	-05	-08	-06	-05	-07	-05	E-08
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
III	4,67	1,12	3,15	1,80E	2,16E	5,72E	4,64E	9,65E	9,99E	1,23E	3,32E	3,07E	4,67
	E-06	E-06	E-06	-06	-05	-04	-04	-08	-05	-05	-07	-05	E-06
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	6,41	9,45	8,29	1,48E	1,15E	3,28E	4,42E	1,24E	1,74E	1,92E	1,96E	1,87E	6,41
	E-07	E-07	E-07	-05	-04	-04	-04	-07	-05	-05	-08	-04	E-07
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	4,91	8,60	4,45	4,45E	6,14E	3,44E	2,36E	6,58E	1,11E	1,42E	1,91E	9,68E	4,91
	E-07	E-07	E-06	-06	-05	-04	-04	-08	-05	-05	-07	-05	E-07
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VI	7,54	1,12	1,55	1,75E	1,35E	3,91E	5,50E	1,46E	2,06E	2,26E	3,66E	2,18E	7,54
	E-07	E-06	E-06	-05	-04	-04	-04	-07	-05	-05	-08	-04	E-07
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VI	7,68	1,51	9,40	8,48E	1,91E	6,51E	4,28E	9,93E	1,81E	5,56E	3,33E	1,92E	7,68
I	E-07	E-06	E-06	-06	-04	-04	-04	-08	-05	-05	-07	-04	E-07
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VI	1,16	5,51	4,05	1,52E	3,65E	1,64E	3,47E	1,48E	2,18E	6,11E	2,32E	3,59E	1,16
II	E-05	E-06	E-07	-05	-04	-03	-04	-06	-04	-05	-09	-05	E-05
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IX	1,05	4,79	3,38	9,09E	1,55E	4,64E	4,35E	1,24E	5,55E	1,51E	1,82E	5,16E	1,05
	E-07	E-08	E-07	-08	-03	-05	-06	-08	-06	-04	-08	-07	E-07

				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
X	6,65	7,23	1,01	2,59E	1,24E	2,89E	1,64E	9,10E	2,64E	1,45E	3,25E	3,99E	6,65	
	E-05	E-03	E-04	-05	-03	-02	-03	-06	-03	-04	-07	-03	E-05	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
XI	5,95	6,59	1,33	5,46E	7,55E	9,73E	1,64E	7,46E	9,26E	1,31E	1,13E	1,88E	5,95	
	E-04	E-04	E-05	-06	-03	-02	-02	-05	-03	-03	-07	-03	E-04	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
XI	1,01	6,82	3,11	9,36E	3,12E		3,57E	1,27E	1,53E	2,19E	1,16E	6,10E	1,01	
I	E-03	E-03	E-04	-05	-03	-0,18	-02	-04	-02	-03	-06	-03	E-03	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
XI	2,35	1,50	1,20	2,08E	4,76E	4,24E	1,66E	3,09E	4,13E	7,69E	9,42E	2,21E	2,35	
II	E-04	E-04	E-05	-05	-04	-02	-02	-05	-03	-04	-08	-03	E-04	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
XI	1,60	3,13	9,61	7,03E	8,11E	2,73E	4,35E	2,06E	2,32E	2,83E	9,39E	5,74E	1,60	
V	E-04	E-03	E-06	-06	-03	-02	-03	-05	-03	-03	-08	-04	E-04	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
X	6,41	3,60			2,67E	9,98E	3,84E	1,39E	1,42E	9,60E		3,33E	6,41	
V	E-08	E-08	0,00	0,00	-04	-06	-06	-08	-06	-05	0,00	-07	E-08	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
X	7,34	4,83	8,86	6,04E	8,14E	1,47E	3,40E	9,93E	1,01E	2,69E	3,05E	2,86E	7,34	
VI	E-10	E-10	E-11	-08	-09	-07	-08	-11	-08	-09	-08	-09	E-10	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
X	1,46	3,51	9,99	4,87E	2,96E	2,41E	6,95E	2,84E	6,96E	1,21E	7,24E	3,78E	1,46	
I	E-06	E-06	E-05	-05	-04	-03	-03	-07	-05	-05	-07	-04	E-06	
				-	-	-	-	-	-	-	-	-		
X	3,14	7,35	3,48	4,91E	2,55E	1,21E	1,20E	1,09E	1,02E	1,88E	1,41E	1,11E	3,14	
I	E-07	E-07	E-07	-07	-04	-03	-04	-07	-05	-05	-08	-05	E-07	

⁵⁾Flujos del ICV se muestran en el Anexo 6

⁶⁾Categoría de imparto: **I.** Calentamiento global, **II.** Agotamiento del ozono estratosférico, **III.** Radiación ionizante, **IV.** Formación de ozono, Salud Humana, **V.** Formación de material particulado fino, **VI.** Formación de ozono, Ecosistema Terrestre, **VII.** Acidificación terrestre, **VIII.** Eutrofización del agua dulce, **IX.** Eutrofización marina, **X.** Ecotoxicidad terrestre, **XI.** Ecotoxicidad del agua dulce, **XII.** Ecotoxicidad marina, **XIII.** Toxicidad

carcinogénica humana, **XIV.** Toxicidad no carcinogénica humana, **XV.** Uso del suelo, **XVI.** Disminución de recursos minerales, **XVII.** Disminución de recursos fósiles, **XVIII.** Consumo de agua

⁽⁷⁾Total

Anexo 10 Puntuación del impacto ambiental por categorías de daños

	Categoría de Daños			
	Salud Humana	Ecosistemas	Recursos	
	Unidad (mPt)			
Total	575.35	<i>458.92</i>	<i>138.57</i>	<i>-22.13</i>
Ácido cítrico anhidro (Miel Final)	12.32	11.51	0.80	0.00
Caña de Azúcar	619.61	475.08	142.71	1.82
Ácido fosfórico	0.40	0.35	0.03	0.02
Lechada de cal	455.15	410.01	38.80	6.34
Floculante	0.41	0.38	0.02	0.00
Ácido clorhídrico	0.41	0.36	0.03	0.02
Hidróxido de sodio	1.57	1.46	0.09	0.01
Soda ash	0.15	0.14	0.01	0.00
Fosfato trisódico	1.51	1.42	0.08	0.01
Sulfato de potasio	0.07	0.06	0.00	0.00
Cloruro de amonio	0.02	0.02	0.00	0.00
Sulfato de magnesio	0.02	0.02	0.00	0.00
Sulfato de hierro	0.37	0.35	0.02	0.00
Sulfato de cinc	2.26	2.18	0.07	0.01
Ácido sulfúrico	3.00	2.51	0.18	0.31
Cachaza	-3.22	-2.84	-0.23	-0.15
Azúcar Comercial Base 96	-77.60	-62.25	-14.46	-0.89
Residuales Líquidos	-238.83	-216.52	-15.94	-6.37
Bagazo disponible	-129.98	-101.77	-6.30	-21.91
Cenizas	-0.05	-0.05	0.00	0.00
Dióxido de carbono (fermentación)	-11.94	-10.97	-0.84	-0.14
Micelio	-10.91	-7.44	-3.44	-0.03
Yeso	-0.12	-0.11	-0.01	-0.01
Electricidad exportada	-49.25	-44.99	-3.07	-1.19

Anexo 11 Productos que contienen Ácido Cítrico



Anexo 12 Ácido cítrico anhidro

