

OPORTUNIDADES DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO POR VÍA FERMENTATIVA A PARTIR DE SUSTRATOS AZUCARADOS EN CUBA

BUSINESS OPPORTUNITIES OF CITRIC ACID PRODUCTION BY FERMENTATION FROM SUGAR SUBSTRATES IN CUBA

Omar Pérez Navarro^{1}, Néstor Ley Chong¹, Karla Regla Rodríguez Marroquí¹
y Erenio González Suárez¹*

¹Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Enero 4, 2016; Revisado: Enero 25, 2016; Aceptado: Marzo 9, 2016

RESUMEN

Se ofrece una propuesta de oportunidades de producción de ácido cítrico en Cuba, empleándose fuentes de sustratos azucarados como azúcar refino, mieles finales de caña y suero de leche, por fermentación sumergida con *Aspergillus Niger*, donde se establece una tecnología a partir del sustrato seleccionado y del microorganismo a utilizar. Este es un proceso exigente en términos de costos de inversión y de operación donde las mejores combinaciones de productividad y costo se alcanzan con miel final seguida de azúcar refino y el suero de leche. Para el sustrato seleccionado, se realizó el balance de masa y energía en cada una de las etapas que conforman el proceso de obtención de ácido cítrico para diferentes de capacidades productivas de ácido cítrico y se determinó el tamaño mínimo económico de 2,5 t/día. Se seleccionó una capacidad de producción de 8 t/día de ácido granulado (2 640 t/a), con inversión total estimada de \$ 9 068 713, un Valor Actual Neto (VAN) de \$1 401 561, una Tasa Interna de retorno (TIR) de 27% y un periodo de recuperación de la inversión (PRD) de 3 años. El proyecto es resistente al aumento del precio de la materia prima y el costo de electricidad y se favorece cuando el proceso está integrado a un Central Azucarero con cogeneración, mientras que es sensible ante una reducción del precio de venta del producto.

Palabras clave: ácido cítrico, miel final, azúcar, suero, oportunidad, factibilidad.

Copyright © 2016. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Omar Pérez, Email: omarpn@uclv.cu

ABSTRACT

A proposal for opportunities of citric acid production in Cuba, using sources of sugar substrates such as refined sugar, molasses and whey, by submerged fermentation with *Aspergillus niger*, where a technology is established from the selected substrate which is provided and the microorganism used. This is a demanding process in terms of investment costs and operation where the best combinations of productivity and cost are achieved with molasses followed by refined sugar and whey. For the selected substrate, the mass and energy balance in each of the steps in the process of obtaining citric acid for different productive capacities of citric acid was made and the minimum economic size of 2.5 t / day was determined. A production capacity of 8 t / day of granulated acid (2 640 t / a), with estimated total investment of \$ 9,068,713, NPV = \$ 1,401,561, IRR = 27% and DPP = 3 years was selected. The project is resistant to the rising price of raw materials and the cost of electricity and is favored when the process is integrated into a sugar mill cogeneration, while it is sensitive to a reduction in the selling price of the product.

Keywords: citric acid, molasses, sugar, whey, timeliness, feasibility.

1. INTRODUCCIÓN

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 $C_6H_8O_7$ y su nombre IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), es ácido 2-hidroxi-1, 2, 3-propanotricarboxílico. En su forma industrial es un polvo cristalino, blanco, inodoro y con sabor ácido fuerte. Es un producto bien cotizado a nivel mundial por sus propiedades como acidulante y preservante que contribuye a asegurar el sabor original, la apariencia natural y la consistencia de los productos. Este es producido fundamentalmente por fermentación sumergida por ser la más efectiva para este proceso utilizando diversos microorganismos capaces de degradar materias primas como almidón, sacarosa y residuos agro-industriales como bagazo, mieles finales de caña, suero de leche y otros Rivada (2008).

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.

- **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 y Kulich, 2004).

En Cuba se aplica en procesos industriales vinculados fundamentalmente a la industria alimentaria y de cosméticos y prospectivamente al sector agroindustrial y textil (Blanco y col., 2005). Estos autores refieren que la menor capacidad de planta reportada en la literatura es de 5 000 t/a de ácido cítrico. Ante la carencia de tecnologías adecuadas para su producción, el país se ve obligado a importarlo como única vía de obtención, a pesar de la disponibilidad de sustratos potenciales para su elaboración. Existen escasos estudios referentes a las perspectivas de producción de ácido cítrico en Cuba y el más abarcador de ellos (López y De la Cruz, 2009) realiza un análisis económico para plantas de diferentes capacidades considerando condiciones de incertidumbre y análisis de sensibilidad pero usando como referencia para calcular los costos de inversión una oferta tecnológica por lo que se hace necesario realizar un análisis técnico y económico en el que además de considerar la sensibilidad y la incertidumbre en el diseño se desarrolle el dimensionamiento detallado de los equipos, previo esquema tecnológico por variantes y un análisis de alternativas para los sustratos disponibles en el país con un enfoque de oportunidad de negocios.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Selección de microorganismos, sustratos y tecnología.

El ácido cítrico se puede obtener por vía sintética y por fermentación. La vía fermentativa, a partir de la degradación de diversas materias primas por la acción de los microorganismos adecuados, es más empleada industrialmente por sus altos rendimientos a gran escala, aunque no todas las combinaciones de materias primas y microorganismos ofrecen rendimientos aceptables. El *Aspergillus niger* es el microorganismo más empleado debido a su facilidad de manejo y habilidad de fermentar una variedad de materias primas baratas con altos rendimientos, sin incrementar la viscosidad del medio favoreciéndose la aireación y la agitación.

Como sustratos principales están el almidón y la sacarosa, no obstante, en la actualidad son también usados residuos agro-industriales diversos con tratamientos previos. Para los residuos sólidos, la naturaleza de la fermentación en estas condiciones no permite resultados económicos positivos a gran escala por lo que la tecnología más extendida es la fermentación sumergida puesto que el contacto entre el gas y el microorganismo disueltos en una solución acuosa del sustrato se ve muy favorecida (Vandenberghe et al., 1999). En el estudio de oportunidades en Cuba, la disponibilidad y los reportes de

productividad y rendimiento de los principales sustratos azucarados a emplearse muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Materias primas empleadas en la producción de ácido cítrico por fermentación sumergida

<i>Materias primas</i>	<i>Cepas</i>	<i>Ácido cítrico (g/L)</i>	<i>Referencia</i>
Mieles finales de caña	<i>Aspergillus niger</i> T 55	99,56	Gómez y col., 1987
Suero de Leche	<i>Aspergillus niger</i> NRRL 2270	30	López y col., 2006
Azúcar Refino	<i>Aspergillus. niger</i> T 110	110	Majumder et al., 2010

La producción máxima de ácido cítrico en estudios de laboratorio que emplearon mieles de caña como sustrato realizados por (Majumder et al., 2010) fue de $(99,56 \pm 3,5 \text{ g/L})$ con *Aspergillus niger* GCBT7, la masa celular seca y el consumo de azúcar fueron de 18,5 g/L y 96,55 g/L, respectivamente. Rivada (2008) diseñó una planta de producción de ácido cítrico a partir de melazas de remolacha con 50% de sacarosa, que arrojó resultados muy alentadores con *Aspergillus niger*, por cada 10 g/L de sacarosa en melazas se produjeron 4 g/L de ácido cítrico, con un crecimiento de la biomasa de 0,1 g/L a 1,3 g/L, la sacarosa residual fue de 1 g/L.

El suero de leche, es el líquido separado de la cuajada durante la elaboración de queso y contiene como promedio 4,9% de lactosa, 0,9% de proteína, 0,6% de cenizas y 0,3% de grasas, entre otros componentes (Marwaha et al., 1988), Betancourt (2003). Es el principal desecho de la industria láctea, aprovechado muy poco como materia prima industrial en Cuba y la mayoría de los volúmenes producidos son usados como alimento animal o vertidos directamente en los cursos de agua naturales, lo que origina un impacto ambiental negativo debido a su elevado contenido de materia orgánica. El *Aspergillus. niger* tiene la capacidad de desdoblarse la lactosa y convertirla directamente en ácido cítrico sin necesidad de hidrólisis previa (Sánchez y col., 2004).

El empleo directo de azúcar refino como medio de cultivo también se ha desarrollado en la producción de ácido cítrico. Se utilizaron la cepa de *Aspergillus niger* CDBBH180 para la obtención de ácido cítrico empleando sacarosa como sustrato. La producción del ácido cítrico se evaluó en un medio de cultivo a 28°C y 190 g/L de sacarosa, alcanzándose una concentración máxima de 45 g/L de ácido cítrico. Otros investigadores (Gómez y col., 1987), estudiaron las condiciones de cultivo sumergido con *Aspergillus niger* 110 considerando diferentes medios de cultivos y flujos de aireación como influyentes en la productividad de ácido cítrico, para el cual, se logró el mejor resultado con una concentración de 150 g/L de sacarosa y 0,25 g/L de fosfato, con una aireación de 1,3 vvm obteniéndose concentraciones de ácido cítrico de 110 g/L. A partir de la descripción del proceso de producción de ácido cítrico, se valoraron las tres alternativas de fuentes de sustrato, obteniéndose los resultados que muestra la tabla 2.

Tabla 2. Aspectos fundamentales del proceso para las diferentes alternativas

<i>Aspectos</i>	<i>Alternativa I Mieles finales</i>	<i>Alternativa II Azúcar Refino</i>	<i>Alternativa III Suero de Leche</i>
Parámetros de la fermentación	pH=6 30°C 60rpm 120h (5d)	pH=4 30°C 60rpm 168h (7 d)	pH=3 28°C 60rpm 192h (8 d)
Concentración de sustrato en materia prima (g/L)	363,8	1055,5	50
Concentración de sustrato a fermentar (g/L)	214	159,12	50
Concentración de ácido cítrico producido (g/L)	99,56	110.00	30
Concentración final de sustrato (g/L)	21,4	10	6
Concentración final de biomasa en base seca (g/L)	27,8	11,5	18
Referencia	(Gómez y col., 1987	Rivada (2008)	(López y col., 2006)

En el análisis de la tabla, se observa que los valores obtenidos con respecto a los parámetros de la etapa fermentativa, la alternativa de mieles finales presenta los mejores resultados y por consiguiente es la más atractiva, debido a que presenta el menor tiempo de duración, menor cantidad de fermentadores y menor consumo de energía. Además de obtener el mayor valor de concentración final de biomasa de las alternativas valoradas lo que se infiere mayores ganancias por la venta del micelio. Por estas razones el análisis económico desarrollado se efectuó considerando como sustrato la miel final.

2.2. Tecnologías de obtención de ácido cítrico a partir de mieles finales de caña.

El proceso de producción de ácido cítrico por fermentación superficial comienza en el pretratamiento de la materia prima que consiste en la purificación del sustrato a utilizar e incluye procesos de clarificación, esterilización y remoción de materias que puedan provocar disturbios en la etapa de fermentación. La esterilización se efectúa a 100°C por intercambio indirecto con vapor de baja presión y evita la presencia de otros microorganismos que compitan por el alimento. Se suplementan los nutrientes requeridos y se inocula el microorganismo, fijando el pH entre 3 y 6. Durante la fermentación se suministra aire u oxígeno al medio fermentativo y se circula agua a 25°C a través de la chaqueta de los biorreactores, contrarrestando el efecto exotérmico de la reacción y manteniendo la temperatura entre 28 y 30°C.

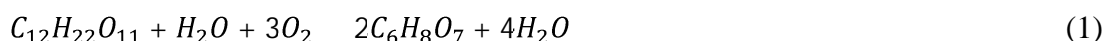
La suspensión fermentada pasa a floculación, decantación, centrifugación, separación y filtración con el objetivo de separar la biomasa (micelio) del licor. La precipitación del citrato se realiza para separar al ácido cítrico del caldo de fermentación, se basa en tratar el licor madre con hidróxido de calcio para formar el citrato de calcio, el cual es sólido y precipita. Posteriormente el citrato de calcio es descompuesto con ácido sulfúrico para formar ácido cítrico libre, que queda solubilizado, donde el sulfato de calcio o yeso precipita. En ambas etapas la reacción química que ocurre es exotérmica y se emplea

agua a 25°C como medio de enfriamiento para mantener la temperatura del medio a 50°C.

Tras el craqueo del citrato cálcico, la solución cruda pasa a evaporación y cristalización. La evaporación se efectúa en un evaporador de doble efecto, que emplea vapor a 140°C y la concentración resultante es de 67% de ácido cítrico (Messing y Schmitz, 1976).

2.3. Producción de ácido cítrico.

En la etapa de pretratamiento, una vez terminado el proceso de esterilización, comenzará a circular agua por las chaquetas de los fermentadores hasta tener la temperatura idónea de fermentación (30°C), el valor del pH debe ser 6. Luego se introduce el inóculo (1 % del volumen efectivo del fermentador), la preparación del inóculo se efectúa a menor escala en dos fermentadores con características similares a los de la producción y bajo las mismas condiciones de fermentación, solo que el tiempo de fermentación es de 2 días debido a que solo se pretende el crecimiento del microorganismo y no la producción de ácido cítrico, aquí por cada 10 g/L de sacarosa se producen 2,1 g/L de ácido cítrico y al finalizar habrán 1 g/L de biomasa y 6 g/L de sacarosa. El sistema de agitación estará conformado por tres pares de paletas de tabiques verticales a una velocidad de 60 rpm. El proceso consumirá 3 moles de oxígeno por cada mol de sacarosa, el aire proveniente del compresor entrará por las paletas del agitador a distintos puntos del fermentador. La reacción que va a tener lugar en los fermentadores es:



La fermentación va a ser la etapa más duradera de todo el proceso, aproximadamente 5 días (120 h), por esta razón la sección de fermentación dispondrá de 25 fermentadores (5 fermentadores en cada ciclo) para que la planta trabaje 330 días al año sin tener que esperar a terminar un ciclo para comenzar otro. Al terminar esta etapa la suspensión fermentada contendrá 99,56 g/L de ácido cítrico, 27,8 g/L de microorganismo (en base seca), 21,4 g/L de sacarosa y el 10% de los nutrientes que se agregaron al comienzo de la etapa, además en el proceso se desprende CO₂ que sale junto con el aire que no se consumió hacia un filtro de gases. La suspensión fermentada pasa a la sección de separación. Los parámetros fundamentales y datos cinéticos para la conformación de esta planta fueron tomados de los estudios realizados por Rivada (2008). En la Figura 1 se aprecia el diagrama de bloques para las dos primeras partes del proceso de producción de ácido cítrico a partir de mieles.

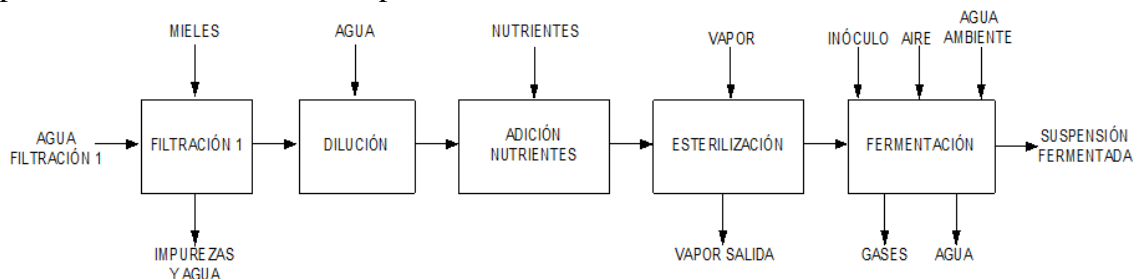


Figura 1. Diagrama de bloques de las secciones de pretratamiento y fermentación del proceso a partir de mieles finales de caña

En la Figura 2 se observa el diagrama de bloques que representan las etapas que

completan el proceso de obtención de ácido cítrico y que son comunes para las tres alternativas de sustrato.

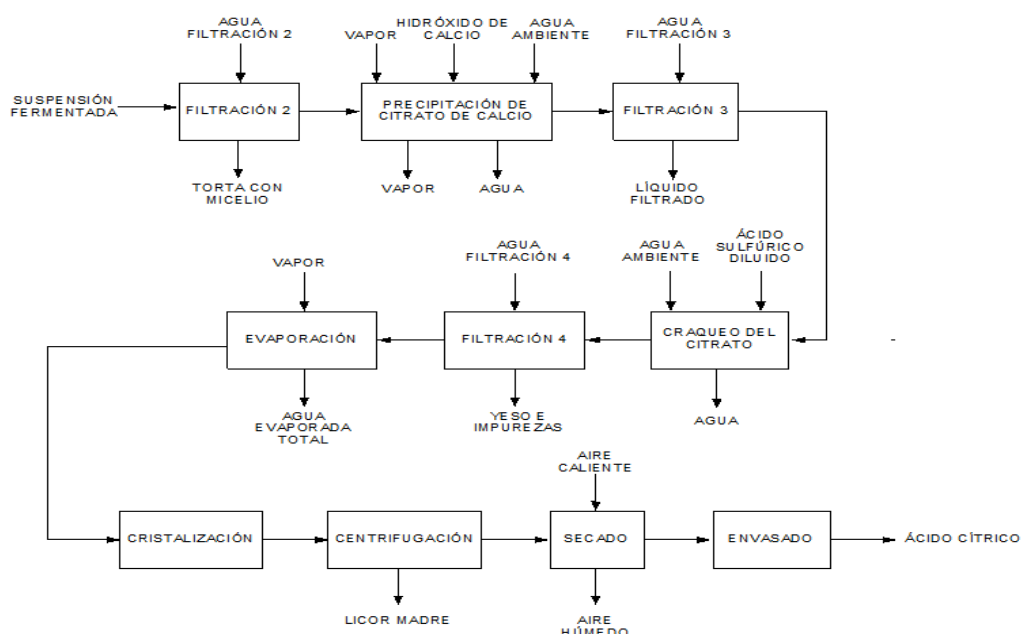


Figura 2. Diagrama de bloques de las secciones comunes para las tres alternativas

2.4. Resultados del balance de masa y energía para la obtención de ácido cítrico a partir de mieles finales

Para la realización de estos balances se consideraron todas las corrientes en kg/día. Cada ciclo tendrá 7 días de duración.

2.4.1. Variables informativas del proceso.

Se partió de unas mieles que contenían un 34% de sacarosa, estas mieles se diluyeron hasta que su contenido bajó a 20 % de sacarosa. La densidad de las mieles diluidas es de 1070 g/L por tanto se tuvo una concentración de sacarosa de 214 g/L. Según Rivada (2008), por cada 10 g/L de sacarosa se obtienen 4 g/L de ácido cítrico, entonces para 214 g/L de sacarosa se obtuvieron 99,56 g/L de ácido cítrico. En dependencia del ácido cítrico a obtener en la fermentación se obtuvieron el valor de mieles sin diluir y la cantidad de sacarosa en ellas. Este valor de ácido cítrico dependió de la cantidad de cristales deseados al finalizar la etapa de secado, la ecuación que se ajustó a esta relación fue:

$$AC_{SF} = 1,2895 \text{ CRS} - 0,0026 \quad (2)$$

La cantidad de sacarosa en mieles (S_M) sin diluir respondió a la ecuación:

$$S_M = \frac{AC_{SF} \cdot c_{AC}}{c_{sac \text{ dil}}} = \frac{AC_{SF} \cdot 0,0856}{0,214} \quad (3)$$

Si 1 kg de mieles tiene 0,34 kg de sacarosa, entonces: $M = \frac{S_M}{0,34}$ (4)

A continuación se muestran en la tabla 3 y la tabla 4, las etapas de los diagramas presentados, los datos y los resultados de los balances de masa y energía realizados en las secciones del proceso de obtención de ácido cítrico.

Tabla 3. Resultados del balance de masa y energía a partir de las mieles finales de caña

<i>Etapa</i>	<i>Datos</i>	<i>Resultados en (kg/d) para 10 t/día de cristales ácido cítrico</i>
Filtración 1	$X_{im}=0,1$; El agua de filtrado representa el 4,5% de las mieles, $x_{AIA} = 0,3$	M=94 816,20 $A_{fil1} = 4 266,73$ IA= 13 545,17 MF= 85 537,75
Dilución	$X_{SM}=0,34$; MF; A_{MF} ; S_{MF} ; $x_{SMD}=0,2$	$A_{dil} = 59 876,43$ MD = 145 414,18
Adición de nutrientes	MD; $M_D = 1,07$ kg/L; $c_{NH_4Cl} = 50 \cdot 10^{-6}$ kg/L $c_{KH_2PO_4} = 33,75 \cdot 10^{-6}$ kg/L; $c_{MgSO_4 \cdot 7H_2O} = 22,5 \cdot 10^{-6}$ kg/L; $c_{FeSO_4 \cdot 7H_2O} = 11,5 \cdot 10^{-6}$ kg/L; $c_{ZnCl_2} = 11,5 \cdot 10^{-6}$ kg/L; $c_{CuSO_4 \cdot 5H_2O} = 11,5 \cdot 10^{-6}$ kg/L	MN = 145 433,21 N = 19,03
Esterilización	MN	ME = 145 433,21
Fermentación	ME ; $x_{IN} = 0,01$; $M_o = 0,02$ kg/mol; c_{sacdil} ; $M_{sac} = 0,342$ kg/mol; $x_o = 0,21$; $M_{CO_2} = 0,044$ kg/mol Por cada mol de sacarosa se consumen 3 moles de oxígeno y se producen 2,41 de dióxido de carbono. $M_E = 1,101$ kg/L; $S_F = 1,079$ kg/L; $c_{MicSF} = 0,0278$ kg/L; $c_{SSF} = 0,0214$ kg/L	$IN = 1 320,92$ $AIR = 20 800,47$ SF = 136 744,33 G = 29 489,35
Filtración 2	SF; Mic_{SF} ; S_{SF} ; A_{SF} ; N_{SF} ; AC_{SF} El agua de filtrado es el 5% de la suspensión fermentada. El agua de la torta es el 3,4 % de la suspensión fermentada.	$A_{fil2} = 6937,22$ $T_{fil2} = 4 649,31$ SFIL2= 138 932,24
Formación de citrato	SFIL2; A_{SFIL2} ; N_{SFIL2} ; S_{SFIL2} ; AC_{SFIL2} ; $x_{cal} = 0,33$ Por cada 1kg de ácido cítrico hay 0,58 kg de hidróxido de calcio	HID = 7 471,62 SC = 146 403,86
Filtración 3	SC; CC_{SC} ; A_{SC} ; N_{SC} ; CAL_{SC} ; S_{SC} ; AC_{SC} ; $x_{ATC} = 0,3$ El agua de filtrado representa el 8,5 % de la solución de citrato	$A_{fil3} = 12 444,33$ LF = 133 048,90 TC = 25 779,29
Craqueo del citrato	TC; CC_{TC} ; A_{TC} Por cada kg de citrato en torta hay 5,3 kg de ácido sulfúrico diluido. Por cada kg de citrato en torta se forman 0,78 kg de yeso. Por cada kg de citrato en torta se liberan 0,68 kg de ácido cítrico	ASD = 80 660,29 ACD = 106 459,58
Filtración 4	ACD; A_{ACD} ; AS_{ACD} ; CC_{ACD} ; Y_{ACD} ; AC_{ACD} ; $x_{AYI} = 0,294$ El agua de filtrado representa el 5,6% del ácido cítrico en disolución	$A_{filt4} = 5961,74$ YI = 18325,22 SFIL4 = 94096,10
Evaporación	SFIL4; A_{SFIL4} ; AC_{SFIL4} ; $x_{ACSFIL4} = 0,11$ $x_{ACSLNC2} = 0,67$; $x_{ACSLNC1} = 0,40$ $x_{ASFIL4} = 0,90$; $C_{pASFIL4(T=60^\circ C)} = 4,18$ kJ/kg °C; $x_{ACSFIL4} = 0,10$ $C_{pACSFIL4(T=60^\circ C)} = C_{pAB(T=60^\circ C)} = 1,20$ kJ/kg °C $T_{entSFIL4} = 40^\circ C$; $T_{ef1} = 80^\circ C$; $v_1 = 2 311,6$ kJ/kg; $T_v = 120^\circ C$; $v_1 = 2 311,6$ kJ/kg; $x_{ASLNC1} = 0,60$; $C_{pASLNC1(T=60^\circ C)} = 4,18$ kJ/kg °C; $x_{ACSLNC1} = 0,40$; $T_{entSLNC1} = 80^\circ C$; $T_{ef2} = 40^\circ C$; $T_{v2} = 40^\circ C$; $v_2 = 2 420,5$ kJ/kg	AET = 132 093, 82 SLNC2 = 15 448,61 SLNC1 = 25 876, 43 $V_1 = 68 219,67$ $M_{v1} = 78 223,61$ $V_2 = 63 874,15$
Cristalización	SLNC2; A_{SLNC2} ; AC_{SLNC2}	CRSIn = 15 448,61
Centrifugación	CRSIn; ACL_{CRSIn} ; CR_{CRSLN} ; AC_{CRSIn} ; $x_{ACRH} = 0,05$	LM = 4 974,6 CRH = 10 474,01

Secado	CRH; A_{CRH} ; ACL_{CRH} ; CR_{CRH} ; $x_0 = 0,21$ Por cada kg de cristales húmedos entran 1,48 kg de aire	AIR = 15 501,54 AIRH = 15 975,24 CRS = 10 000
Envasado	CRS; ACL_{CRS} ; CR_{CRS} ; A_{CRS} ; Peso = 25 kg	CRSS = 10 000 (400 sacos)

Leyenda de los balances de masa.

AC_{SF} : Ácido cítrico solución fermentada, kg/día.
 CRS : Cristales secos ácido cítrico, kg/día.
 S_M : Sacarosa en mieles, kg/día.
 C_{AC} , C_{sac} dil: Concentración de ácido cítrico y sacarosa respectivamente, kg/L
 M , MF : Miel y Miel filtrada respectivamente, kg/día
 A_{filt1} : Agua de filtrado 1, kg/día
 IA : Corriente impurezas y agua, kg/día
 I_M , I_{IA} : Impurezas en mieles y en corriente impurezas y agua respectivamente, kg/día
 A_M , A_{IA} : Agua en mieles y en corriente impurezas y agua respectivamente, kg/día
 x_{im} : Fracción de impurezas en mieles.
 x_{AIA} : Fracción de agua en impurezas y agua.
 A_{MF} : Agua en mieles filtradas, kg/día
 S_{MF} : Sacarosa en mieles filtradas, kg/día
 A_{dil} : Agua de dilución, kg/día
 MD : Miel diluida, kg/día
 x_{SM} : Fracción de sacarosa en mieles.
 x_{SMD} : Fracción de sacarosa en mieles diluidas.
 A_{MD} : Agua en mieles diluidas, kg/día
 S_{MD} : Sacarosa en mieles diluidas, kg/día
 MN : Miel y nutrientes, kg/día
 N : Nutrientes, kg/día
 C_{NH_4Cl} : Concentración de NH_4Cl , kg/L
 $C_{KH_2PO_4}$: Concentración de KH_2PO_4 , kg/L
 $C_{MgSO_4 \cdot 7H_2O}$: Concentración de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, kg/L
 $C_{FeSO_4 \cdot 7H_2O}$: Concentración de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, kg/L
 C_{ZnCl_2} : Concentración de $ZnCl_2$, kg/L
 $C_{CuSO_4 \cdot 5H_2O}$: Concentración de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, kg/L
 ρ_{MD} : densidad de mieles diluidas, kg/L
 ME : Miel esterilizada, kg/día
 IN : Inóculo, kg/día
 AIR : Aire, kg/día
 SF : Suspensión fermentada, kg/día
 G : Gases, kg/día
 x_{IN} : fracción de inóculo en mieles esterilizadas
 ρ_{ME} : densidad de mieles esterilizadas, kg/L
 O_{AIR} : oxígeno en el aire, kg/día
 x_O : Fracción de oxígeno en el aire.
 n_O : cantidad de sustancia de oxígeno, mol
 M_O : Masa molar oxígeno, kg/mol
 n_S : cantidad de sustancia de sacarosa, mol
 cm_{sac} dil: concentración molar de sacarosa diluida, mol/L
 M_{sac} : Masa molar sacarosa, kg/mol
 Nit_{AIR} : nitrógeno en el aire, kg/día
 O_G : Oxígeno en gases, kg/día
 Nit_G : nitrógeno en gases, kg/día
 CO_{2G} : Dióxido de carbono en gases, kg/día
 n_{CO_2} : cantidad de sustancia de dióxido de carbono, mol
 M_{CO_2} : Masa molar dióxido de carbono, kg/mol
 Mic_{SF} : Micelio en suspensión fermentada, kg/día
 S_{SF} : Sacarosa en suspensión fermentada, kg/día
 A_{SF} : Agua en suspensión fermentada, kg/día
 N_{SF} : Nutrientes en suspensión fermentada, kg/día
 C_{MicSF} : concentración del micelio en suspensión fermentada, kg/L
 C_{SF} : concentración de sacarosa en suspensión fermentada, kg/L

ACD : Ácido cítrico en disolución, kg/día
 A_{ASD} : Agua en ácido sulfúrico diluido, kg/día
 AS_{ASD} : ácido sulfúrico en ácido sulfúrico diluido, kg/día
 A_{ACD} : Agua en ácido cítrico en disolución, kg/día
 AS_{ACD} : ácido sulfúrico en ácido cítrico en disolución, kg/día
 CC_{ACD} : citrato de calcio en ácido cítrico en disolución, kg/día
 Y_{ACD} : Yeso en ácido cítrico en disolución, kg/día
 AC_{ACD} : ácido cítrico en ácido cítrico en disolución, kg/día
 A_{filt4} : Agua de filtrado 4, kg/día
 YI : Yeso e impurezas, kg/día
 $SFIL4$: Solución filtrada 4, kg/día
 Y_{YI} : Yeso en yeso e impurezas, kg/día
 AC_{YI} : ácido cítrico en yeso e impurezas, kg/día
 CC_{YI} : citrato de calcio en yeso e impurezas, kg/día
 AS_{YI} : ácido sulfúrico en yeso e impurezas, kg/día
 A_{YI} : Agua en yeso e impurezas, kg/día
 x_{AYI} : Fracción de agua en yeso e impurezas.
 A_{SFIL4} : Agua en solución filtrada 4, kg/día
 AC_{SFIL4} : ácido cítrico en solución filtrada 4, kg/día
 C_{pSFIL4} : Calor específico de solución filtrada 4, kJ/kg*°C
 T_{ef1} : Temperatura en el efecto 1, °C
 $T_{entSFIL4}$: Temperatura entrada de solución filtrada 4, °C
 V_1 : Vapor en el efecto 1, kg/día
 λ_{v1} : Calor latente de vapor en el efecto 1, kJ/kg
 AET : Agua evaporada total, kg/día
 m_v : vapor de entrada, kg/día
 λ_v : Calor latente de vapor de entrada, kJ/kg
 x_{ASFIL4} : Fracción de agua en solución filtrada 3
 $C_{pASFIL4}$: Calor específico de agua en solución filtrada 4, kJ/kg*°C
 $x_{ACSFIL4}$: Fracción de ácido cítrico en solución filtrada 4
 $C_{pACSFIL4}$: Calor específico de ácido cítrico en solución filtrada 4, kJ/kg*°C
 T_v : Temperatura de vapor de entrada, °C
 Q_{2gEV} : Calor ganado en el efecto 2, kJ
 Q_{2cEV} : Calor cedido en el efecto 2, kJ
 $SLNC1$: Solución concentrada 1, kg/día
 C_{pSLNC1} : Calor específico de solución concentrada 1, kJ/kg*°C
 T_{ef2} : Temperatura en el efecto 2, °C
 $T_{entSLNC1}$: Temperatura entrada de solución concentrada 1, °C
 V_2 : Vapor en el efecto 2, kg/día
 λ_{v2} : Calor latente de vapor en el efecto 2, kJ/kg
 x_{ASLNC1} : Fracción de agua en solución concentrada 1
 $C_{pASLNC1}$: Calor específico de agua en solución concentrada 1, kJ/kg*°C
 $x_{ACSLNC1}$: Fracción de ácido cítrico en solución concentrada 1
 $C_{pACSLNC1}$: Calor específico de ácido cítrico solución concentrada 1, kJ/kg*°C
 $SLNC2$: Solución concentrada 2, kg/día
 A_{SLNC2} : Agua en solución concentrada 2, kg/día
 AC_{SLNC2} : ácido cítrico en solución concentrada 2, kg/día
 $x_{ACSLNC2}$: fracción de ácido cítrico en solución concentrada 2, kg/día
 AC_{SLNC1} : ácido cítrico en solución concentrada 1, kg/día
 A_{SLNC1} : Agua en solución concentrada 1, kg/día

- A_{filt 2}*: Agua de filtrado 2, kg/día
T_{filt 2}: Torta de filtrado 2, kg/día
SFIL2: Solución filtrada filtración 2, kg/día
A_{T filt 2}: Agua en torta de filtrado 2, kg/día
Mic_T: micelio en torta de filtrado 2, kg/día
S_T: Sacarosa en torta de filtrado 2, kg/día
AC_T: ácido cítrico en torta de filtrado 2, kg/día
A_{SFIL 2}: agua en solución filtrada filtración 2, kg/día
N_{SFIL2}: nutrientes en solución filtrada filtración 2, kg/día
S_{SFIL2}: Sacarosa en solución filtrada filtración 2, kg/día
AC_{SFIL2}: ácido cítrico en solución filtrada filtración 2, kg/día
HID: Hidróxido de calcio, kg/día
SC: Solución con citrato, kg/día
A_{HID}: Agua en hidróxido, kg/día
CAL: óxido de calcio en hidróxido, kg/día
x_{cal}: Fracción de cal en hidróxido.
CC_{sc}: citrato de calcio en solución con citrato, kg/día
A_{sc}: Agua en solución con citrato, kg/día
N_{sc}: nutrientes en solución con citrato, kg/día
CAL_{sc}: óxido de calcio en solución con citrato, kg/día
S_{sc}: sacarosa en solución con citrato, kg/día
AC_{sc}: ácido cítrico en solución con citrato, kg/día
A_{filt 3}: Agua de filtrado 3, kg/día
LF: Líquido filtrado, kg/día
TC: Torta con citrato, kg/día
A_{LF}: Agua en líquido filtrado, kg/día
N_{LF}: nutrientes en líquido filtrado, kg/día
CAL_{LF}: óxido de calcio en líquido filtrado, kg/día
S_{LF}: sacarosa en líquido filtrado, kg/día
AC_{LF}: ácido cítrico en líquido filtrado, kg/día
CC_{Tc}: citrato de calcio en torta con citrato, kg/día
A_{TC}: Agua torta con citrato, kg/día
x_{ATC}: fracción de agua en torta con citrato
ASD: Ácido sulfúrico diluido, kg/día
S_{AZ}: Sacarosa en azúcar, kg/ciclo.
AZ: azúcar, kg/ciclo
A_{AZ}: Agua en azúcar, kg/ciclo
AZD: azúcar diluida, kg/día
x_{SAZ}: Fracción de sacarosa en azúcar.
x_{SAZD}: Fracción de sacarosa en azúcar diluida.
A_{AZD}: Agua en azúcar diluida, kg/día
S_{AZD}: Sacarosa en azúcar diluida, kg/día
AZN: azúcar y nutrientes, kg/día
c_{NH4Cl}: Concentración de $(NH_4)_2SO_4$, kg/L
c_{KH2PO4}: Concentración de K_2SO_4 , kg/L
*c_{FeSO4*7H2O}*: Concentración de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, kg/L
c_{ZnCl2}: Concentración de $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$, kg/L
ρ_{AZD}: densidad de azúcar diluida, kg/L
AZE: Azúcar esterilizada, kg/día
ρ_{AZE}: densidad de azúcar esterilizada, kg/L
T_{filt 2}: Torta de filtrado 1, kg/día
L_S: Lactosa en suero, kg/día
c_{sac dil}: Concentración de lactosa, kg/L
x_{AC SLNC1}: Fracción de ácido cítrico en solución concentrada 1, kg/día
CR_{Sn}: Cristales en solución, kg/día
ACL_{CRSn}: Ácido cítrico líquido en cristales en solución, kg/día
CR_{CRSn}: Cristales en cristales en solución, kg/día
A_{CRSn}: Agua en cristales en solución, kg/día
LM: Licor madre, kg/día
CRH: Cristales húmedos, kg/día
A_{LM}: Agua en licor madre, kg/día
ACL_{LM}: Ácido cítrico líquido en licor madre, kg/día.
CR_{LM}: Cristales en licor madre, kg/día.
ACL_{CRH}: Ácido cítrico líquido en cristales húmedos, kg/día
A_{CRH}: Agua en cristales húmedos, kg/día
CR_{CRH}: Cristales en cristales húmedos, kg/día.
x_{ACRH}: Fracción de agua en cristales húmedos, kg/día.
AIR2: Aire de secado, kg/día.
AIRH: Aire húmedo, kg/día.
O_{AIR2}: Oxígeno en aire de secado, kg/día
Nit_{AIR2}: Nitrógeno en aire de secado, kg/día
A_{AIRH}: Agua en aire húmedo, kg/día
O_{AIRH}: Oxígeno en aire húmedo, kg/día.
Nit_{AIRH}: Nitrógeno en aire húmedo, kg/día
A_{CRS}: Agua en cristales secos, kg/día
ACL_{CRS}: Ácido cítrico líquido en cristales secos, kg/día
CR_{CRS}: Cristales en cristales secos, kg/día
CRSS: Cristales secos en sacos, kg/día
SFIL1: Solución filtrada filtración 1, kg/día
A_{T filt 2}: Agua en torta de filtrado 1, kg/día
Mic_T: micelio en torta de filtrado 1, kg/día
S_T: Sacarosa en torta de filtrado 1, kg/día
AC_T: ácido cítrico en torta de filtrado 1, kg/día
A_{SFIL 1}: agua en solución filtrada filtración 1, kg/día
N_{SFIL1}: nutrientes en solución filtrada filtración 1, kg/día
S_{SFIL1}: Sacarosa en solución filtrada filtración 1, kg/día
AC_{SFIL1}: ácido cítrico en solución filtrada filtración kg/día
SFIL3: Solución filtrada 3, kg/día
A_{SFIL3}: Agua en solución filtrada 3, kg/día
AC_{SFIL3}: ácido cítrico en solución filtrada 3, kg/día
M_L: Masa molar lactosa, kg/mol
L_{SF}: Lactosa en suspensión fermentada, kg/día
c_{LSF}: concentración de lactosa en suspensión fermentada, kg/L
L_T: Lactosa en torta de filtrado 2, kg/día
L_{SFIL2}: Lactosa en solución filtrada filtración 2, kg/día
L_{SC}: lactosa en solución con citrato, kg/día
L_{LF}: Lactosa en líquido filtrado, kg/día
IG_S: Impurezas y grasa en suero, kg/día
A_S: Agua en suero, kg/día
IG_{IGA}: Impurezas y grasa en impurezas, grasa y agua, kg/día
S: Suero, kg/día
IGA: Impurezas, grasa y agua, kg/día
SF: Suero filtrado, kg/día
cm_L: concentración molar de lactosa, mol/L

Tabla 4. Resultados del balance de energía del proceso a partir de mieles finales

<i>Etapa</i>	<i>Datos</i>	<i>Resultados para 10 t/día de cristales ácido cítrico</i>
Esterilización	$MN; T_{v\ est} = 120\ C; v_{\ est} = 2202,7\ kJ/kg$ $C_{pMN(T=60\ C)} = 3,3\ kJ/kg\ C; T_{ent\ MN} = 20\ C;$ $T_{sal\ MN} = 100\ C$	$Q_{g\ est} = - Q_{cest} = 38394367\ kJ$ $V_{est} = 17429,86\ kg/d$
Fermentación Enfriamiento de las mieles esterilizadas.	$ME; C_{pME(T=100C)} = 3,45\ kJ/kg\ C$ $T_{ent\ ME} = 100\ C; T_{sal\ ME} = 30\ C$ $C_{p\ A1\ fer(T=35C)} = 4,18\ kJ/kg\ C$ $T_{ent\ A1\ fer} = 25\ C; T_{sal\ A1\ fer} = 45\ C$	$Q_{1g\ fer} = -Q_{1cfer} = 3512212\ kJ$ $A_{1\ fer} = 420\ 121\ kg/d$

Mantenimiento de la temperatura de mieles e inóculo	$C_{p ME(T=30\text{ }^{\circ}\text{C})} = 3,19 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $T_{ent ME} = 30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{sal ME} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_{p A2 fer(T=30\text{ }^{\circ}\text{C})} = 4,18 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$ $T_{ent A2 fer} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{sal A2 fer} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Q_{2g fer} = -Q_{2c fer} = 234072 \text{ kJ}$ $A_{2 fer} = 5599,83 \text{ kg/d}$
Formación de citrato Para mantener mezcla con cal 50°C Para aumentar la solución con citrato a 90°C	SFIL2; HID; $C_{p MEZ(T=30\text{ }^{\circ}\text{C})} = 3,82 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $C_{p A MEZ(T=30\text{ }^{\circ}\text{C})} = 4,18 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $C_{p AC MEZ(T=30\text{ }^{\circ}\text{C})} = C_{p AB (T=30\text{ }^{\circ}\text{C})} = 1,20 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $X_{A MEZ} = 0,88$; $X_{AC MEZ} = 0,12$; $T_{ent MEZ} = 50,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sal MEZ} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $C_{p A MEZ(T=30\text{ }^{\circ}\text{C})} = 4,18 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $T_{ent A1 fc} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sal A1 fc} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; SC ; $T_{v fc} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v_{fc} = 2202,7 \text{ kJ/kg}$; $C_{p SC (T=90\text{ }^{\circ}\text{C})} = C_{p A (T=90\text{ }^{\circ}\text{C})} = 4,18 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $T_{ent SC} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{sal SC} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Q_{1g fc} = -Q_{1c fc} = 279821,12 \text{ kJ}$ $A_{1 fc} = 3347,14 \text{ kg/d}$ $Q_{2c fc} = -Q_{2g fc} = 24278725,68 \text{ kJ}$ $V_{fc} = 11112,59 \text{ kg/d}$
Craqueo del citrato	TC; ASD; $C_{p MEZCQ (T=50\text{ }^{\circ}\text{C})} = C_{p ASD (T=50\text{ }^{\circ}\text{C})} = 3,84 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$ $T_{ent MEZCQ} = 50,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{sal MEZCQ} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $C_{p ACQ(T=35\text{ }^{\circ}\text{C})} = 4,18 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $T_{ent ACQ} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sal ACQ} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Q_{g cQ} = -Q_{c cQ} = 204402,39 \text{ kJ}$ $A_{cQ} = 2445,00 \text{ kg/día}$
Evaporación Efecto 1 Efecto 2	m_v ; v ; V_1 ; v_1	$Q_{1gEV} = -$ $Q_{1cEV} = 172310340,9 \text{ kJ}$ $Q_{2gEV} = -$ $Q_{2cEV} = 157698497,04 \text{ kJ}$
Secado	AIR2; $T_{v sec} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v_{sec} = 2202,7 \text{ kJ/kg}$ $C_{p AIR2(T=45\text{ }^{\circ}\text{C})} = 0,25 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$; $T_{ent AIR2} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{sal AIR2} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Q_{g sec} = -Q_{c sec} = 135638,46 \text{ kJ}$ $V_{sec} = 61,58 \text{ kg/día}$

Leyenda de los balances de energía.

$Q_{g est}$: Calor ganado en la esterilización, kJ
 $Q_{c est}$: Calor cedido en la esterilización, kJ
MN: Mieles y nutrientes, kg/ciclo
 $C_{p MN}$: Calor específico mieles y nutrientes, kJ/kg*°C
 ΔT_{MN} : Variación temperatura mieles y nutrientes, °C
 V_{est} : Vapor en la esterilización, kg/ciclo
 $\lambda_{v est}$: Calor latente vapor esterilización, kJ/kg
 $T_{ent MN}$: Temperatura entrada mieles y nutrientes, °C
 $T_{sal MN}$: Temperatura salida mieles y nutrientes, °C
 $Q_{1g fer}$: Calor ganado enfriamiento fermentación, kJ
 $Q_{1c fer}$: Calor cedido enfriamiento fermentación, kJ
ME: Mieles esterilizadas, kg/ciclo
 $C_{p ME}$: Calor específico mieles esterilizadas kJ/kg*°C
 ΔT_{ME} : Variación temperatura mieles esterilizadas, °C
 $A_{1 fer}$: Agua para enfriar en la fermentación, kg/ciclo
 $C_{p A1 fer}$: Calor específico agua para enfriar en la fermentación, kJ/kg*°C
 $T_{A1 fer}$: Variación de temperatura del agua para enfriar en la fermentación, °C
 $T_{ent ME}$: Temperatura entrada mieles esterilizadas, °C
 $T_{sal ME}$: Temperatura salida mieles esterilizadas, °C
 $T_{ent A1 fer}$: Temperatura de entrada del agua para enfriar las mieles esterilizadas, °C
 $T_{sal A1 fer}$: Temperatura de salida del agua para enfriar las mieles esterilizadas, °C
 $Q_{2g fer}$: Calor ganado al mantener la temperatura en la fermentación, kJ

$X_{AC MEZ}$: Fracción del ácido cítrico en la mezcla.
 $C_{p AC MEZ}$: Calor específico ácido cítrico mezcla, kJ/kg*°C.
 $C_{p AB}$: Calor específico ácido benzoico, kJ/kg*°C.
 $T_{ent MEZ}$: Temperatura entrada de mezcla, °C
 $T_{sal MEZ}$: Temperatura salida de mezcla, °C
 $T_{ent A1 fc}$: Temperatura de entrada de agua para mantener la temperatura de mezcla, °C
 $T_{sal A1 fc}$: Temperatura de salida agua para mantener la temperatura de mezcla, °C
 $Q_{2g fc}$: Calor ganado calentar solución de citrato, kJ
 $Q_{2c fc}$: Calor cedido calentar solución de citrato, kJ
SC: Solución con citrato, kg/día
 $C_{p SC}$: Calor específico solución citrato, kJ/kg*°C
 ΔT_{SC} : Variación temperatura solución citrato, °C
 V_{fc} : Vapor en la formación de citrato, kg/día
 $\lambda_{v fc}$: Calor latente en la formación de citrato, kJ/kg
 $T_{v fc}$: Temperatura vapor formación de citrato, °C
 $C_{p A (T=90\text{ }^{\circ}\text{C})}$: Calor específico de agua, kJ/kg*°C
 $T_{ent SC}$: Temperatura entrada solución citrato, °C
 $T_{sal SC}$: Temperatura salida solución citrato, °C
 $Q_{g cQ}$: Calor ganado en el craqueo, kJ
 $Q_{c cQ}$: Calor cedido en el craqueo, kJ
MEZCQ: Mezcla en el craqueo, kg/día
 $C_{p MEZCQ}$: Calor específico mezcla craqueo, kJ/kg*°C
 ΔT_{MEZCQ} : Variación temperatura mezcla craqueo, °C
TC: Torta con citrato, kg/día

$Q_{2c\ fer}$: Calor cedido al mantener la temperatura en la fermentación, kJ
 IN : Inóculo, kg/ciclo
 $A_{2\ fer}$: Agua circulada en la fermentación, kg/ciclo
 $C_{p\ A_{2\ fer}}$: Calor específico agua mantener temperatura en la fermentación, kJ/kg*°C
 $T_{A_{2\ fer}}$: Variación de temperatura del agua para mantener la temperatura en la fermentación, °C
 $T_{ent\ A_{2\ fer}}$: Temperatura de entrada del agua para mantener la temperatura en la fermentación, °C
 $T_{sal\ A_{2\ fer}}$: Temperatura de salida del agua para mantener la temperatura en la fermentación, °C
 $Q_{1\ g\ fc}$: Calor ganado mantener temperatura mezcla, kJ
 $Q_{1\ c\ fc}$: Calor cedido mantener temperatura mezcla, kJ
 MEZ : Mezcla, kg/día
 $C_{p\ MEZ}$: Calor específico de la mezcla, kJ/kg*°C
 ΔT_{MEZ} : Variación de temperatura de la mezcla, °C
 $SFIL2$: Solución filtrada filtración 2, kg/día
 HID : Hidróxido de calcio, kg/ciclo
 $A_{1\ fc}$: Agua mantener temperatura mezcla, kg/día
 $C_{p\ A_{1\ fc}}$: Calor específico de agua para mantener la temperatura de la mezcla, kJ/kg*°C
 $T_{A_{1\ fc}}$: Variación de temperatura del agua para mantener la temperatura de mezcla, °C
 $x_{A\ MEZ}$: Fracción del agua en la mezcla.
 $C_{p\ A\ MEZ}$: Calor específico agua mezcla, kJ/kg*°C.
 AZN : Azúcar y nutrientes, kg/día
 $C_{p\ AZN}$: Calor específico azúcar y nutrientes, kJ/kg*°C
 ΔT_{AZN} : Variación temperatura azúcar y nutrientes, °C
 $T_{ent\ AZN}$: Temperatura entrada azúcar y nutrientes, °C
 $T_{sal\ AZN}$: Temperatura salida azúcar y nutrientes, °C
 AZE : azúcar diluida y esterilizada, kg/día
 $C_{p\ AZE}$: Calor específico del azúcar diluida y esterilizada, kJ/kg*°C
 T_{AZE} : Variación de temperatura del azúcar diluida y esterilizada, °C
 $T_{ent\ AZE}$: Temperatura entrada azúcar esterilizada, °C
 $T_{sal\ AZE}$: Temperatura salida azúcar esterilizada, °C
 SN : Suero y nutrientes, kg/día
 $C_{p\ SN}$: Calor específico suero y nutrientes, kJ/kg*°C
 ΔT_{SN} : Variación temperatura suero y nutrientes, °C
 $T_{sal\ SE}$: Temperatura de salida del suero esterilizado, °C
 $T_{ent\ SE}$: Temperatura de entrada suero esterilizado, °C

ASD : ácido sulfúrico diluido, kg/día
 A_{CQ} : Agua en el craqueo, kg/día
 $C_{p\ A\ CQ}$: Calor específico agua craqueo, kJ/kg*°C
 $\Delta T_{A\ CQ}$: Variación temperatura agua craqueo, °C
 $C_{p\ ASD}$: Calor específico ácido sulfúrico diluido craqueo, kJ/kg*°C
 $T_{ent\ MEZCQ}$: Temperatura entrada mezcla craqueo, °C
 $T_{sal\ MEZCQ}$: Temperatura salida mezcla craqueo, °C
 $T_{ent\ A\ CQ}$: Temperatura entrada agua craqueo, °C
 $T_{sal\ A\ CQ}$: Temperatura salida agua craqueo, °C
 $Q_{1\ g\ EV}$: Calor ganado en el efecto 1, kJ
 $Q_{1\ c\ EV}$: Calor cedido en el efecto 1, kJ
 V_1 : Vapor en el efecto 1, kg/día
 $\lambda_{v\ 1}$: Calor latente de vapor en el efecto 1, kJ/kg
 $Q_{2\ g\ EV}$: Calor ganado en el efecto 2, kJ
 $Q_{2\ c\ EV}$: Calor cedido en el efecto 2, kJ
 m_v : Vapor de entrada, kg/día
 λ_v : Calor latente de vapor de entrada, kJ/kg
 $Q_{g\ sec}$: Calor ganado en el secado, kJ
 $Q_{c\ sec}$: Calor cedido en el secado, kJ
 $AIR2$: Aire de secado, kg/día.
 $C_{p\ AIR2}$: Calor específico de aire de secado, kJ/kg*°C
 ΔT_{AIR2} : Variación temperatura de aire de secado, °C
 V_{sec} : Vapor de secado, kg/día
 $\lambda_{v\ sec}$: Calor latente de vapor de secado, kJ/kg
 $T_{v\ sec}$: Temperatura de vapor de secado, °C
 $T_{ent\ AIR2}$: Temperatura entrada vapor secado, °C
 $T_{sal\ AIR2}$: Temperatura de vapor de secado, °C
 $SFIL1$: Solución filtrada filtración 1, kg/día
 $SFIL3$: Solución filtrada 3, kg/día
 $C_{p\ SFIL3}$: Calor específico solución filtrada 3, kJ/kg*°C
 $T_{ent\ SFIL3}$: Temperatura entrada solución filtrada 3, °C
 $x_{A\ SFIL3}$: Fracción de agua en solución filtrada 3
 $C_{p\ A\ SFIL3}$: Calor específico de agua en solución filtrada 3, kJ/kg*°C
 $x_{AC\ SFIL3}$: Fracción ácido cítrico solución filtrada 3
 $C_{p\ AC\ SFIL3}$: Calor específico ácido cítrico en solución filtrada 3, kJ/kg*°C
 SE : Suero esterilizado, kg/día
 $C_{p\ SE}$: Calor específico del suero esterilizado, kJ/kg*°C
 $T_{ent\ SN}$: Temperatura entrada suero y nutrientes, °C
 $T_{sal\ SN}$: Temperatura de salida del suero y nutrientes, °C
 ΔT_{SE} : Variación temperatura suero esterilizado, °C
 $T_{ent\ SE}$: Temperatura entrada suero esterilizado, °C

2.5. Evaluación económica de la producción de ácido cítrico a partir de las mieles finales de caña.

El costo total invertido (CTI) y costo total de producción (CTP) se estimó según la metodología de (Peters y Timmerhaus, 1991). En la tabla 5 se muestran los resultados de estos indicadores económicos para diferentes capacidades de producción en toneladas diarias, además de los ingresos por ventas y las ganancias obtenidas. Los precios de los productos en \$/kg son: Ácido cítrico 2,70, Micelio, 0,68, Licor Madre 0,68 y yeso 0,07.

Tabla 5. Principales resultados económicos para el proceso a partir de mieles finales de caña a diferentes capacidades de planta

<i>Capacidad de planta (t/día)</i>	<i>CTI (\$)</i>	<i>CTP (\$/a)</i>	<i>Ventas (\$/a)</i>	<i>Ganancias (\$/a)</i>
1	-4 247 525,93	1 915 326,53	1 200 038,87	-715 287,66
2	-5 540 206,73	2 609 016,83	2 400 077,2	-208 939,63
3	-6 578 252,11	3 224 522,2	3 600 115,53	375 593,33
4	-7 484 484,85	3 802 291,59	4 800 153,86	997 862,27
5	-8 306 499,68	4 357 766,53	6 000 192,19	1 642 425,66
6	-9 068 713,15	4 898 747,86	7 200 230,52	2 301 482,66
7	-9785633,11	5 429 797,21	8 400 268,85	2 970 471,64
8	-10 466 713,96	5 953 838,28	9 600 307,18	3 646 468,9
9	-11 118 523,77	6 472 867,42	10 800 345,51	4 327 478,09
10	-11 745 845,38	6 988 312,53	12 000 383,84	5 012 071,31

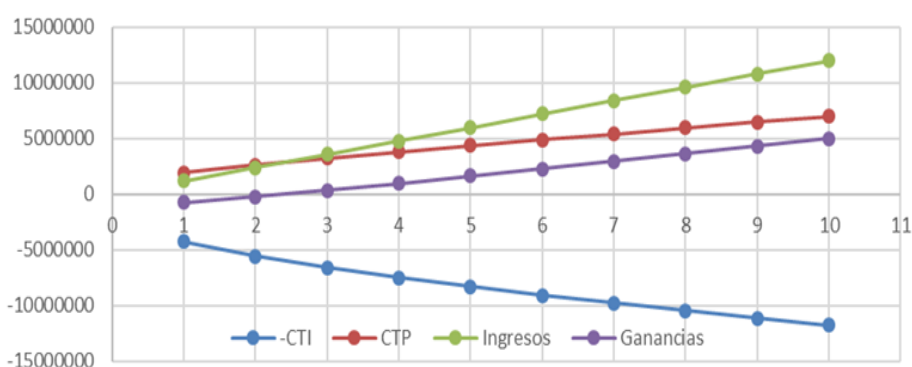


Figura 3. Principales resultados económicos de producción de ácido cítrico para el proceso a partir de mieles finales de caña a diferentes capacidades productivas

En la figura 3, se observa que con una capacidad productiva de 2,5 t/d, se logra el punto de equilibrio para este proceso.

En la Tabla 6 se muestran los valores de VAN, TIR y PRD a los 10 años de puesta en marcha de la planta para diferentes capacidades de planta en la alternativa de mieles.

Tabla 6. Valores de los Indicadores económicos para diferentes capacidades en la alternativa de mieles a los 10 años de puesta en marcha de la planta

<i>Capacidad (t/d)</i>	<i>VAN (\$)</i>	<i>TIR (%)</i>	<i>PRD (años)</i>
4	6961615,07	10	6
6	14501561,24	27	3
8	22250171,46	38	2,3
10	30102777,00	47	2

Para la planta de ácido cítrico a partir de mieles al incrementar la capacidad de la planta aumentaron los valores del VAN y el TIR, y el Tiempo de Recuperación disminuyó. A partir de una capacidad de 8 t/día se obtuvieron valores más optimistas en los indicadores económicos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de sensibilidad de la alternativa de mieles finales.

Se realizó un estudio de sensibilidad para la variante de mieles finales, donde se varió el costo del consumo eléctrico, el costo de la miel final y precio de venta del ácido cítrico. Para este análisis se fijó la capacidad de la planta a 8 t/día de ácido cítrico. En las tablas 7, 8 y 9 se presentan los resultados de CTI, VAN, TIR y PRD al efectuar las variaciones correspondientes.

Tabla 7. Resultados obtenidos al variar el precio de la electricidad

Valor (%)	CTI (\$)	VAN (\$)	TIR (%)	PRD (años)
-25	10466713,96	23526022,98	40	2,1
0	10466713,96	22250171,46	38	2,3
+25	10466713,96	20974319,94	36	2,5

Tabla 8. Resultados obtenidos al variar el precio de las mieles

Valor (%)	CTI (\$)	VAN (\$)	TIR (%)	PRD (años)
-25	10 466 713,96	24 917 615,97	43	2,0
0	10 466 713,96	22 250 171,46	38	2,3
+25	10 466 713,96	20 249 588,07	34	2,5

Tabla 9. Resultados obtenidos al variar el precio del ácido cítrico

Valor (%)	CTI (\$)	VAN (\$)	TIR (%)	PRD (años)
-25	10 466 713,96	12 213 912,78	17	4,4
0	10 466 713,96	22 250 171,46	38	2,3
+25	10 466 713,96	32 286 430,14	56	1,7

Los resultados muestran que el proyecto es robusto ante variaciones del precio de la electricidad y la materia prima fundamental. El análisis con respecto a la electricidad se realizó por a la alta influencia de este elemento en los costos de operación, principalmente en la etapa de fermentación y resulta evidente la mejoría de este elemento de costo al ubicar la instalación anexa a un Central Azucarero con cogeneración. Respecto al precio de las mieles el proyecto se favoreció desde el punto de vista de la competitividad frente a otras alternativas consumidoras de miel como la producción de etanol, sin embargo, como puede apreciarse que el proyecto no resiste disminuciones considerables del precio del ácido cítrico puesto que el PRD se incrementa por encima de los 4 años si el precio disminuye en un 25%.

4. CONCLUSIONES

1. La principal vía de obtención de ácido cítrico es la fermentativa y el proceso de producción se conduce más eficientemente por vía sumergida a partir de sustratos azucarados preferentemente con el *Aspergillus niger*.
2. La alternativa más ventajosa para la producción de ácido cítrico es utilizar como sustrato las mieles finales de la caña de azúcar donde se logra alta concentraciones de ácido cítrico con un menor tiempo de fermentación.

3. El proyecto para una capacidad de 8 t/día es sensible con respecto a la reducción del precio del ácido cítrico, no ocurre de esta manera ante variaciones del precio de las mieles y el costo de electricidad, este último favorecido con la cogeneración de un central azucarero.

REFERENCIAS

- Betancourt, A.L., Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación en cultivo líquido., Trabajo de grado en la modalidad de Proyecto final para optar por el Título de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia Manizales, 2003, pp. 1-167.
- Blanco, G., Herryman, M., Situación mundial y tendencias en la producción y uso del ácido cítrico., Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), No. 1, 2005, pp 48-51.
- Gómez, R., Schnabel, I., Garrido, J., Factores que afectan la producción de ácido cítrico en cultivo sumergido por *Aspergillus niger* 110., *Interferón y Biotecnología*, Vol. 5. No. 1, 1987, pp 18-33.
- López, L., De la Cruz, R., Estudio de diferentes capacidades productivas de ácido cítrico en la región Central de Cuba., *Revista Universidad Eafit*, Vol. 45, No. 153, enero-marzo, 2009, pp. 62-69.
- López, C.A., Zuluaga, A., Herrera, S. N., Ruiz, A.A., Medina, V.I., Producción de ácido cítrico con *Aspergillus niger* NRRL 2270 a partir de suero de leche., *DYNA*, Vol. 73, No. 150, 2006, pp. 39-57.
- Majumder, L., Khalil, I., Munshi, M.K., Alam, K., Rashid, H.-O., Begum, R., Alam, N., Citric Acid Production by *Aspergillus niger* Using Molasses and Pumpkin as Substrates., *European Journal of Biological Sciences*, Vol. 2, No. 1, 2010, pp. 01-08.
- Marwaha, S.S., and Kennedy, J.F., Whey-pollution problem and potential utilization. *International Journal of Food Science & Technology*, Vol. 23, No. 4, 1988, pp. 323–336.
- Mendoza, J.C.D. and Kulich, E.I., Aplicación de balances de masa y energía al proceso de fermentación en estado sólido de bagazo de caña de azúcar con *Aspergillus niger*., *Biotecnología Aplicada*, Vol. 21, No. 2, 2004, pp. 85-91.
- Messing, W. and Schmitz, R., Technical production of citric acid on the basic molasses., *ChED Chem Exp Didakt*2, 1976, pp. 306-316.
- Peters, M.S, Timmerhaus, K.D., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, New York, Chemical Engineering series XV, 1991, pp. 1-910.
- Rivada, F.J., Planta industrial de producción de ácido cítrico a partir de melazas de remolacha., Proyecto de Carrera de Ingeniería Química, Universidad de Cadiz, 2008, pp 1-145.
- Sánchez, Ó.J., Ortiz, M.C. y Betancourt, A.L., Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus* spp., *Revista Colombiana de Biotecnología*, Vol. VI, No. 1, julio, 2004, pp. 43-54.
- Vandenbergh, L.P.S., Soccol, C.R., Pandey, A. and Lebeault, J.M., Microbial Production of Citric Acid., *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Vol. 42, No. 3, 1999, pp. 1-14.