



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i3.2045>

Ciencias técnicas y aplicadas  
Artículo de investigación

***Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger****

***Evaluation the process of the citric acid production fermentation with the use of *Aspergillus niger****

***Avaliação do processo de produção de ácido cítrico por fermentação com o uso de *Aspergillus niger****

María Augusta Guadalupe-Alcoser<sup>I</sup>  
[ma.guadalupe@uea.edu.ec](mailto:ma.guadalupe@uea.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-0547-215X>

Adrián Alejandro Rodríguez-Pinos<sup>III</sup>  
[adrian.rodriguez@epoch.edu.ec](mailto:adrian.rodriguez@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-7157-1877>

Karina Gabriela Salazar-Llangarí<sup>II</sup>  
[gabriela.salazar@epoch.edu.ec](mailto:gabriela.salazar@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-0527-3289>

Hannibal Lorenzo Brito-Moína<sup>IV</sup>  
[hbrito@epoch.edu.ec](mailto:hbrito@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-7536-857X>

**Correspondencia:** [ma.guadalupe@uea.edu.ec](mailto:ma.guadalupe@uea.edu.ec)

\***Recibido:** 22 de mayo del 2021 \***Aceptado:** 20 de junio del 2021 \* **Publicado:** 05 de julio del 2021

- I. Magister en Ingeniería Química Aplicada, Máster Universitario en Sistemas Integrados de Gestión de la Prevención de Riesgos Laborales, la Calidad, el Medio Ambiente y la Responsabilidad Social Corporativa, Ingeniera Química, Docente Investigador, Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.
- II. Master Universitario en Química Sostenible, Ingeniera Química, Gestión Ambiental, Formación de Formadores, Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Orellana, Ecuador.
- III. Master of Science in Chemical Engineering, Ingeniero Químico, Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Especialista en Computación Aplicada al Ejercicio Docente, Maestría en Protección Ambiental, Diploma Superior las Nuevas Tecnologías de la Información y Comunicación y su Aplicación en la Práctica Docente Ecuatoriana, Magister en Docencia Universitaria e Investigación Educativa, Ingeniero Químico, Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

## Resumen

La evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*, se realizó a través de cuatro modelos de simulación con el uso de un software para procesos, los parámetros de diseño fueron establecidos mediante estudios previos, que se ingresaron a la plataforma de cálculo, posteriormente los resultados obtenidos en cada modelo se analizaron técnica y económicamente, lo que permitió determinar el modelo óptimo de producción de ácido cítrico (Modelo dos), que determina una cantidad de producción de ácido cítrico de 6 914. 69 ton/año, una inversión total de \$ 31 460 000 junto a un VAN (Valor actual neto) de \$165 000 y un TIR (Tasa interna de retorno) del 8.05%, lo que indica que el proyecto se puede llevar a cabo y resulta rentable en un tiempo de retribución de 8 años. Al modelo escogido se realizó un análisis estadístico descriptivo, aplicando una t-sudent; lo que confirma la aceptación de la hipótesis nula que quiere decir que el modelo dos es el más viable al mostrar una gran relación entre la media de producción (19.72 ton/lote) y la producción final del modelo (21.08 ton/lote), con una confiabilidad del 95%. El proceso consta de dos etapas: fermentación y aislamiento, que deben realizarse bajo las condiciones de operación ( $T= 25^{\circ}\text{C}$  y  $P= 1$  atmósfera en la mayoría de las operaciones) y las condiciones óptimas de fermentación para el *Aspergillus niger* ( $T= 35^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{pH}= 5.8$  y  $P= 1$  atmósfera) que son adecuadas para obtener un producto de calidad que pueda ofertarse en el mercado nacional como internacional. Finalmente, se comprueba que el uso de software permite desarrollar estudios técnicos sin la necesidad de recurrir a largos períodos de tiempo con análisis experimentales en laboratorio, es decir, nos ahorra: tiempo, costos de pre-diseño y errores.

**Palabras Clave:** Ingeniería y tecnología química; procesos industriales; simulación/ superpro designer (software) / fermentación/ modelos de simulación/ variables/ parámetros de operación.

## Abstract

The production process of citric acid is evaluated through fermentation by using *Aspergillus niger* microorganism for Hetween Cía. Ltd company; This procedure was carried out through four simulation models with the use of a software for processes, the design parameters were provided by the company, which were entered into the calculation platform, subsequently the results obtained in each model were analyzed technically and economically, which allowed to determine the most optimal model of citric acid production (model two), which determines an amount of citric acid

Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

---

production of 6 914. 69 tons per year, a total investment of \$ 31 460 000 together with a NPV (Net Present Value) of \$165 000 and an IRR (Internal Rate of Return) of 8.05%, which indicates that the project can be conducted and it is profitable in an 8-year compensation period. To the selected model, a descriptive statistical analysis was carried out, applying a t- student; This confirms the acceptance of the null hypothesis which means that model two is the most viable, showing a great relationship between the production average (19.72 tons / lot) and the final production of the model (21.08 tons / lot)., with a 95% reliability. The process consists of two stages: fermentation and isolation, which must be carried out under the operating conditions ( $T= 25^{\circ}\text{C}$  and  $P= 1$  atmosphere in most of the operations) and the optimal fermentation conditions for the *Aspergillus niger* ( $T=35^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{pH}= 5.8$  and  $P= 1$  atmosphere) that are adequate to obtain a quality product that can be offered in the national and international markets. Finally, it is verified that the use of computer software allows to develop technical studies without the need to resort to long working hours with experimental laboratory analysis, that is, it saves us: time, pre-design costs and trial errors.

**Keywords:** Chemical engineering and technology; industrial processes / simulation / superpro designer (software) / fermentation / simulation models / variables / operating parameters.

## Resumo

A avaliação do processo de produção de ácido cítrico por fermentação com o uso de *Aspergillus niger*, foi realizada através de quatro modelos de simulação com a utilização de um software de processos, os parâmetros de projeto foram estabelecidos através de estudos anteriores, os quais foram inseridos na plataforma de cálculo, posteriormente os resultados obtidos em cada modelo foram analisados técnica e economicamente, o que permitiu determinar o modelo ótimo de produção de ácido cítrico (Modelo dois), que determina uma quantidade de produção de ácido cítrico de 6.914,69 ton / ano, um investimento total de \$ 31.460.000 junto com um VPL (Valor Presente Líquido) de \$ 165.000 e uma TIR (Taxa Interna de Retorno) de 8,05%, o que indica que o projeto pode ser executado e é rentável em um período de pagamento de 8 anos. Foi realizada análise estatística descritiva do modelo escolhido, aplicando-se um t-sudent; o que confirma a aceitação da hipótese nula de que significa que o modelo dois é o mais viável por apresentar uma ótima relação entre a produção média (19,72 ton / lote) e a produção final do modelo (21,08 ton / lote), com 95% de confiabilidade . O processo consiste em duas etapas: fermentação e isolamento, que deve ser realizado em condições operacionais ( $T =$

25°C e P = 1 atmosfera na maioria das operações) e as condições ideais de fermentação para *Aspergillus niger* (T = 35°C, pH = 5,8 e P = 1 atmosfera) que são adequados para obter um produto de qualidade que pode ser oferecido no mercado nacional e internacional. Por fim, verifica-se que o uso de software permite o desenvolvimento de estudos técnicos sem a necessidade de recorrer a longos períodos de tempo com análises experimentais em laboratório, ou seja, nos economiza: tempo, custos de pré-projeto e erros.

**Palavras-chave:** Engenharia química e tecnologia; processos industriais; simulação / superpro designer (software) / fermentação / modelos de simulação / variáveis / parâmetros operacionais.

## Introducción

El ácido cítrico (ácido 2-hidroxi-1, 2, 3-propanotricarboxílico), es un ácido orgánico que se considera natural, sin embargo, también se puede sintetizar vía laboratorio, es parte de casi todos los tejidos animales y vegetales, se presenta en forma de ácido de frutas en el limón, mandarina, lima, toronja, naranja, piña, ciruela, guisantes, melocotón, así como en los huesos, músculos y sangre de animales. Es considerado un ácido carboxílico versátil y se utiliza en el campo de la alimentación, de los productos farmacéuticos y cosméticos, entre otros (Muñoz, Sáenz, López, Cantú, & Barajas, 2014).

En el laboratorio, el ácido cítrico se sintetiza a partir de microorganismos en una base de azúcar. Se aisló por primera vez a partir del zumo de limón mezclado con cal y disolviendo el precipitado con ácido sulfúrico (Sánchez, Ortiz, & Betancourt, 2004).

Kumar & Jain (2008), manifiesta en su investigación: “Solid state fermentation studies of citric acid production”, que alrededor del 99% de la producción mundial de ácido cítrico se obtiene por procesos microbianos. Se comercializa como un ácido anhidro o monohidratado, se espera una producción anual de 1.5 millones de toneladas de las cuales el 70% se destina a la industria de alimentos y bebidas como acidificante o antioxidante para preservar o mejorar los sabores y aromas de jugos de frutas, helados y mermeladas. 20% se usa, en la industria farmacéutica como antioxidante para conservar las vitaminas, efervescentes, correctores de pH. El 10% restante se utiliza en la industria química como un agente de formación de espuma para el ablandamiento y el tratamiento de los textiles. En la metalurgia, se usa para el abrillantado y eliminación del óxido en metales como el cobre y aleaciones como el latón. El ácido cítrico también se utiliza en la

industria de los detergentes como un sustituto de fosfato, debido al menor efecto eutrófico (Bischof, Flincec, Budimir, & Kalenic, 2011).

Las industrias en Ecuador no producen ácido cítrico, este se exporta desde Alemania, Estados Unidos, China, Uruguay y otros países lo cual eleva el costo de importación, es por esto el desarrollo de una investigación mediante el uso de un software que permita evaluar y diseñar un proceso de producción industrial de ácido cítrico a partir del hongo *Aspergillus Niger*.

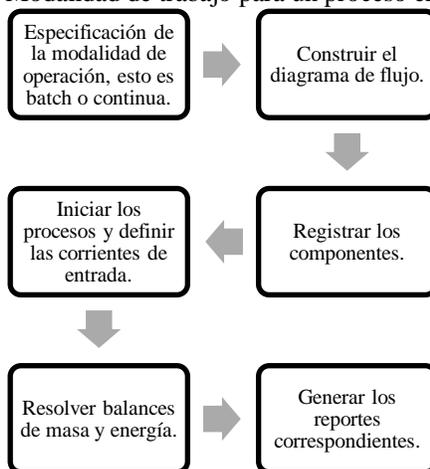
## Métodos y Técnicas

### Ingeniería Conceptual del Proceso

La investigación se desarrolló de forma ordenada y sistemática, se inició con la revisión de fuentes bibliográficas específicas al tema, como libros, artículos científicos, páginas web, para definir conceptos, teorías, condiciones y variables de proceso. Para la simulación del proceso de producción de ácido cítrico con el uso de *Aspergillus Niger*, se empleó el software SuperPro Designer; éste es un programa computacional que permite realizar la simulación de procesos en estado estacionario. Existen procesos en los que se pueden alcanzar condiciones de estacionalidad gracias a la simulación, esto facilita el estudio y operación de los mismos, además incluyen cambios en los parámetros y variables de operación (Designer, 2019).

Para iniciar la simulación de un proceso en el software, se siguen los pasos que se indican a continuación en la Figura 1:

**Figura 1:** Modalidad de trabajo para un proceso en el simulador



Fuente: Elaboración propia

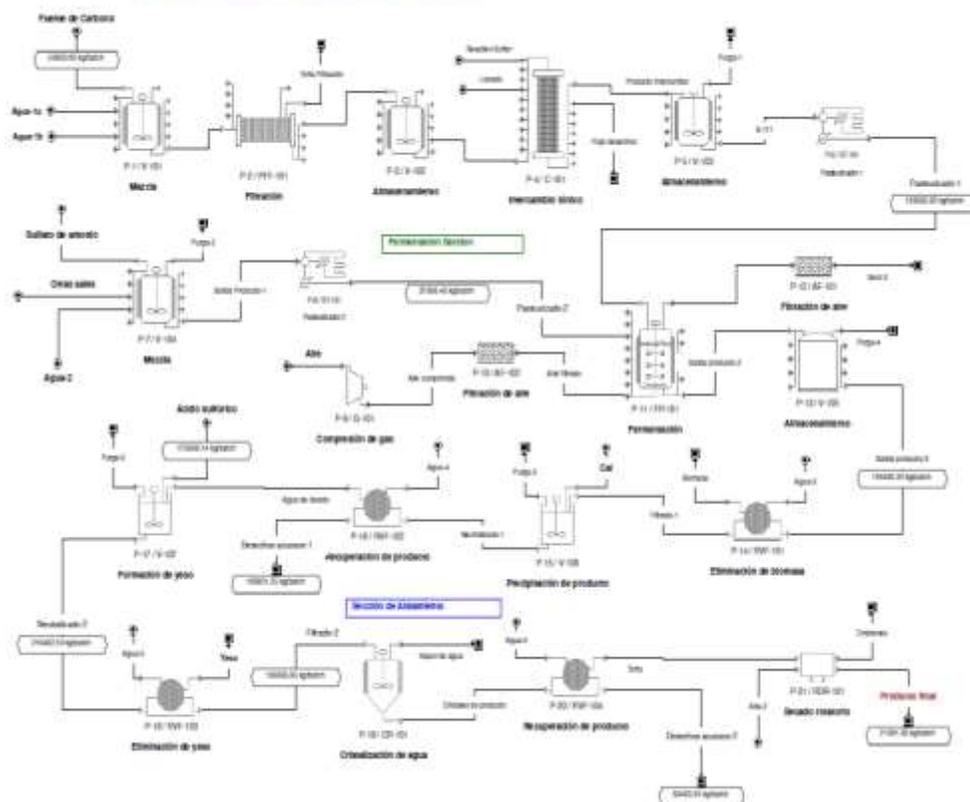
### **Proceso de diseño y simulación**

El diseño y simulación de un proceso de producción sigue los pasos que se indican a continuación. Se inicia con la generación de ideas sobre el proceso a diseñarse, en este caso la producción de ácido cítrico por medio de fermentación, donde se realiza la ingeniería conceptual del proceso, se indican las etapas, además de procesos y operaciones necesarias para cumplir con el objetivo propuesto. Una vez que se ha definido la ingeniería conceptual, se procede a realizar la planificación estratégica del proceso de diseño y posterior simulación. En segundo lugar, se desarrolla el proceso de acuerdo a la ingeniería conceptual y se evalúa las alternativas, para seleccionar la más viable y óptima. Posterior a esto, se diseñan las facilidades y se realizan los ajustes al proceso, esto en primer lugar se lo puede realizar por medio de simulación, esto nos dará como resultado la ingeniería de detalle. Finalmente, se procede a optimizar el proceso, analizar los tiempos de los ciclos y se puede programar la producción a llevarse a cabo en la planta diseñada.

### **Diagrama General del Proceso de Producción de Ácido Cítrico**

En la Figura 2, se indica el diagrama de flujo del proceso. El diseño del proceso se realiza para obtener 6 914 toneladas métricas de ácido cítrico por año en forma cristalina, que se utiliza por la industria para preservar los alimentos y bebidas, así como mejorar su sabor.

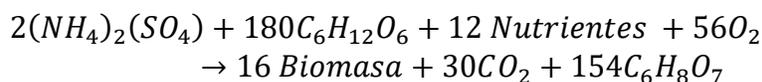
**Figura 2:** Diagrama del proceso de producción de ácido cítrico  
*Producción de Ácido Cítrico*



Fuente: SuperPro Designer®

La fuente de carbono que se utiliza para la fermentación es la melaza, misma que se diluye con agua hasta un 50% de azúcares fermentables (V-101). El material particulado suspendido se elimina por medio de filtración (PFF-101). Los iones metálicos, particularmente el ión de hierro, son subsecuentemente removidos por una columna cromatográfica de intercambio iónico (C-101) y la solución de materia prima purificada se esteriliza con calor en un pasteurizador (ST-101). Los nutrientes tal como zinc, fuentes de amonio, potasio, fósforo, magnesio y cobre, son disueltos en agua (V-104) y esterilizado al calor (ST-101).

Después de la esterilización, los nutrientes y la fuente de carbono se transfieren a un fermentador (FR-101). La fermentación ocurre de acuerdo a la siguiente reacción:



**Reacción 1**

El tiempo de fermentación es de 5 días a una temperatura constante de 35 °C, con un pH de 5.8 hasta tener un rendimiento de reacción del 99%. El aire necesario para mantener las condiciones aerobias de la fermentación se realiza por medio de un compresor (G-101). El agua de enfriamiento remueve el calor producido por el proceso exotérmico y mantiene la temperatura constante.

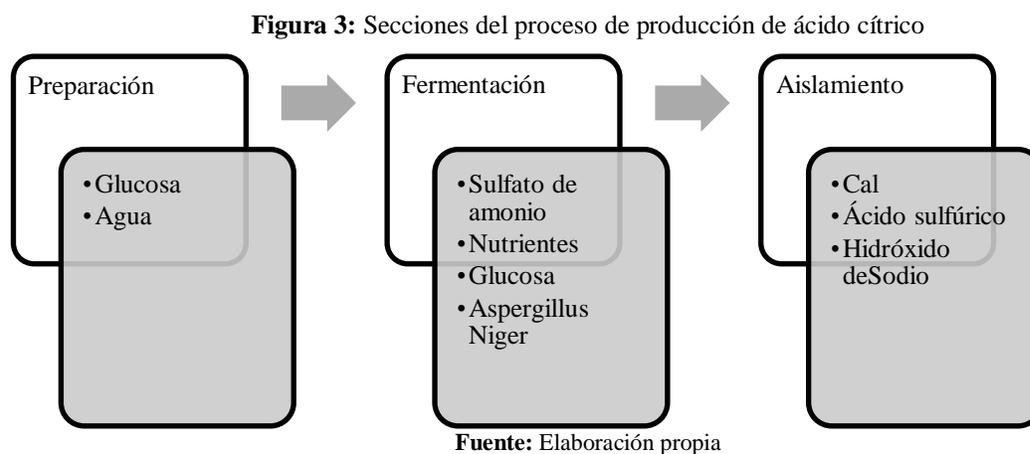
Para satisfacer la demanda de producción, la fermentación es llevada a cabo por 7 fermentadores que operan en modo alternado. Además, la planta opera todo el día y un lote de fermentación se inicia y otro se finaliza diariamente. Cada fermentador tiene un volumen de 150 m<sup>3</sup>. Luego de la fermentación, el caldo se descarga dentro de un tanque de retención (V-105), el cual actúa como un tanque de regulación buffer entre el lote que ingresa y la sección de salida.

Con el aislamiento del ácido cítrico, se obtiene este compuesto de forma pura, y su purificación inicia con la remoción de la biomasa por un filtro al vacío rotatorio (RVF-101). Este líquido clarificado de la fermentación subsecuentemente fluye dentro de un reactor agitado (V-106) donde se añade aproximadamente una parte de cal hidratada, Ca (OH)<sub>2</sub>, por 2 partes de licor; en donde se obtiene un precipitado de citrato de calcio. El citrato de calcio es entonces separado por medio de un segundo filtro rotatorio al vacío (RVF-102) y el filtrado libre de citrato (Desecho Acuoso-1) es enviado a un tanque de colección de desechos.

La torta de citrato de calcio se envía a otro reactor agitado (V-107), en donde se añade ácido sulfúrico para formar un precipitado de sulfato de calcio (yeso). Un tercer filtro (RVF-103) remueve el precipitado de yeso y una solución de ácido cítrico impuro. Es importante cuidar el control del pH y la temperatura en la precipitación para maximizar el rendimiento de ácido cítrico. La solución resultante es concentrada y cristalizada mediante un cristizador continuo (CR-101).

### **Descripción del proceso de producción de ácido cítrico**

Como se observa en la Figura 3, el proceso industrial de producción del ácido cítrico se divide en dos secciones: fermentación y aislamiento. La primera, es donde se encuentran todos los procesos necesarios para llevar a cabo la obtención del ácido cítrico a partir de la fermentación de la melaza utilizando *Aspergillus Niger*. La segunda sección del proceso, corresponde a todas las operaciones necesarias, para obtener el ácido cítrico puro en forma cristalina.



### Sección de Fermentación

Para la obtención del ácido cítrico mediante fermentación con *Aspergillus Niger* se utiliza como materia prima la melaza, que es la fuente de carbono. La melaza es diluida, para proceder a remover los sólidos suspendidos, además de separar los iones metálicos, especialmente el hierro, y finalmente esterilizarla mediante pasteurización con el fin de eliminar todos los microorganismos que produzca compuestos no deseados en la fermentación. Se añade a la melaza sustancias que mejoraran el proceso de fermentación y vuelve a ser esterilizada antes de realizarse la fermentación respectiva. Una vez preparada la mezcla y aditivos se procede a realizar la fermentación en condiciones aeróbicas mediante inóculo de *Aspergillus Niger* hasta obtener el producto final y almacenarlo, para que posteriormente este producto sea dirigido hacia la sección de aislamiento.

### Sección de Aislamiento

En el producto final de la fermentación se procede a eliminar la biomasa, obteniendo un producto totalmente líquido y sin sólidos. En este producto se elimina los sub productos y aditivos residuales del proceso de fermentación mediante precipitación, resultando una corriente líquida de ácido cítrico que por procesos de cristalización y secado se genera el producto final: ácido cítrico en forma cristalina.

#### a. Requerimiento de materias primas

Como materias primas se requiere: agua, melaza, sulfato de amonio, nutrientes, nitrógeno, hidróxido de sodio, hidróxido de calcio, nitrógeno, oxígeno, cal y ácido sulfúrico. Mientras que

Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

como productos se tiene: biomasa, cristales de ácido cítrico, citrato de calcio, dióxido de carbono, yeso, impurezas,

### b. Datos Generales del Proceso para el cálculo

Los cálculos de diseño requieren de los datos generales del proceso de producción del ácido cítrico, estos datos son referentes a como se opera la planta de producción y el tiempo de operación de la misma como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Datos generales del proceso

Tiempo de Operación Anual	47.90	Semana
Tasa de Referencia de Unidad de Producción	6 914 691.48	kg MP
Tamaño del lote	21 081.38	kg MP
Tiempo de preparación de ingredientes del lote	199.18	H
Tiempo del ciclo de preparación de ingredientes	24.00	H
Número de lotes por año	328.00	

\*MP: Flujo total de la corriente "Producto final"

Fuente: Elaboración propia

MP hace referencia al Flujo Total de la Corriente 'Producto Final', el tiempo de operación anual, se encuentra dado en número de semanas y su cálculo se efectúa acorde al tiempo de operación de la planta, se tiene en cuenta que, la planta opera continuamente y las operaciones son una mezcla de procesos por lote, semicontinuos o continuos.

### c. Requisitos de partida de materia prima por sección

En los requisitos de materia prima se presenta la sección de producción con la respectiva materia prima de partida como es la glucosa en el caso de la fermentación y como producto activo al ácido cítrico en fase acuosa. Mientras que, la sección de aislamiento tiene como materia prima de partida el ácido cítrico producido en la sección de fermentación y como producto activo el ácido cítrico en forma de cristales.

**Tabla 2:** Requisitos de partida de materia prima por sección

Sección	Material de Partida	Producto Activo	Rendimiento Másico (%)	Masa Bruta Rendimiento (%)
Sección de Fermentación	Glucosa	Ácido Cítrico	84.53	84.53
Sección de Aislamiento	Ácido Cítrico	Cristales de Ácido Cítrico	92.25	92.25

Fuente: Elaboración propia

Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

---

La cantidad necesaria representada en kg/kg, representa el mínimo requerido para que los procesos de producción se ejecuten de forma eficiente. El rendimiento molar, rendimiento másico y rendimiento de masa bruta, corresponde al porcentaje de transformación de materia prima a producto activo mediante los procesos de producción, como se indican los valores en la Tabla 2.

#### d. Total de materias primas

En un proceso de producción es importante conocer las cantidades a ser utilizadas de cada materia prima que interviene en el proceso de producción, para poder planificar el stock de las mismas.

En la Tabla 3, se presenta los kilogramos necesarios de cada materia prima por año, lote y cantidad de producto final.

**Tabla 3:** Total de materias primas

Material	kg/año	kg/lote
Agua	56 701 804	172 871.354
Melaza	17 646 400	53 800.000
Sulfato de Amonio	277 580	846.281
Nutrientes	1 894 077	5 774.626
Nitrógeno	49 204	150.013
NaOH (1 M)	2 617 888	7 981.366
Air	123 178 744	375 544.952
Cal (33%)	13 659 737	41 645.539
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (10% w/w)	57 628 992	175 698.145
TOTAL	273 654 427	834 312.276

**Fuente:** Elaboración propia

#### e. Balance general de masa del proceso de producción de ácido cítrico

En el balance general de compuestos se presentan cada una de las sustancias químicas, impurezas y nutrientes intervienen en todo el proceso de producción.

La melaza en este balance se encuentra representada como glucosa e impurezas, también se presencia un componente NFS, el cual es Nitrógeno, Fósforo y Azufre que es utilizado para efectuar la fermentación.

### f. Condiciones y variables óptimas de operación

- Identificación de los equipos utilizados en el diseño

A continuación, en la Tabla 4, se presentan los equipos utilizados en los procesos involucrados en la producción de ácido cítrico, con las características generales para las cuales sirve y el modo de operación, pudiendo ser este último: por lotes o batch, continuos y semicontinuos.

**Tabla 4:** Equipos utilizados en el diseño

Diagrama	Descripción
	<b>Tanque de mezcla</b> Este proceso permite realizar mezclas o almacenamiento de líquidos que requieren ser agitados.
	<b>Filtro de Placa y Marco</b> Este proceso se utiliza en la industria química, alimentos e industrias ambientales, presenta la filtración y formación de la torta mediante remoción de los sólidos suspendidos desde una lechada.
	<b>Cromatografía de adsorción de lecho empacado</b> Este proceso se refiere a cualquier tipo de cromatografía de adsorción, como es el intercambio iónico, afinidad, fases reversas, etc., donde se encuentra una columna de lecho empacado.
	<b>Pasteurización</b> Este proceso consiste en la inactivación de microorganismos y mide la cinética de degradación de componentes alimenticios.
	<b>Fermentador por lote</b> Operación típica en un fermentador, mediante la cual se convierte la biomasa (fuente de carbono) en un producto más simple, en este caso no necesariamente incluyen reacciones de fermentación como estequiometría o cinética.
	<b>Almacenamiento de Lote en Tanque de Fondo plano</b> Este equipo permite almacenar productos líquidos, por lo que un sin número de procesos lo utilizan.
	<b>Filtro Rotario al Vacío</b> Este diagrama representa la filtración con generación de torta de forma continua, produce altos rendimientos.
	<b>Neutralización</b> Este equipo representa la neutralización de un compuesto ácido o básico.
	<b>Cristalizador Continuo</b> Equipo utilizado para la evaporación de una capa fina de producto, provocando la cristalización de los compuestos de interés.
	<b>Secador Rotatorio</b> Equipo que maneja una gran eficiencia y se utiliza en la industria química y de alimentos. El proceso de secado se da directamente con uso de una corriente de gas caliente o indirectamente mediante la utilización de vapor en una chaqueta.

Fuente: SuperPro Designer®

## Diseño y simulación del proceso de producción de ácido cítrico

Para el diseño y simulación se selecciona el tipo de proceso, en este caso los fermentadores tienen una operación por lotes, mientras que, el cristizador opera de forma continua. Luego se debe ingresar todas las sustancias que intervienen en el proceso: materia prima y productos, además de registrar las mezclas. Posterior a esto, se realiza el diagrama del proceso junto a la secuencia de operaciones para cada equipo. Seguido se procede a revisar los parámetros de los equipos, el costo de los mismos, las características mecánicas, los aditivos, el rendimiento y si existieran comentarios.

## Resultados

### Validación de la simulación

Para la validación del proceso de producción de ácido cítrico se modelan cuatro procesos, en los que se varían las cantidades de materia prima como es melaza y agua, por tanto, se espera que la cantidad de ácido cítrico (producto final) cambie. En las tablas a continuación se muestran las variaciones para cada modelo.

#### a. Modelo 1

Para el modelo 1 se toman cantidades pequeñas de materia prima y se obtiene una cantidad razonable de ácido cítrico, esto para una planta de producción pequeña, como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Datos modelo 1

Melaza	Agua	Cristales de ácido cítrico
kg/lote	kg/lote	kg/lote
1 000	1000	391.85

Fuente: Elaboración propia

#### b. Modelo 2

Para el modelo 2 se toman como referencia las necesidades propuestas por la empresa, se plantean cantidades grandes de materia prima, por tanto, se obtiene una gran producción de ácido cítrico; como se muestra en la Tabla 6.

Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

**Tabla 6:** Datos modelo 2

Melaza	Agua	Cristales de ácido cítrico
kg/lote	kg/lote	kg/lote
53 800	42 000	21 081.38

Fuente: Elaboración propia

### c. Modelo 3

Para el modelo 3, se incrementan las cantidades de materia prima de melaza y agua; la producción de ácido cítrico aumenta, como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7:** Datos modelo 3

Melaza	Agua	Cristales de ácido cítrico
kg/lote	kg/lote	kg/lote
67 000	100 000	26 253.76

Fuente: Elaboración propia

### d. Modelo 4

Para el modelo 4, se duplica la cantidad de materia prima referente a los modelos 2 y 3, se mantiene la cantidad de agua a la entrada, la producción triplica, como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8:** Datos modelo 4

Melaza	Agua	Cristales de ácido cítrico
kg/lote	kg/lote	kg/lote
139 841	100 000	54 796.30

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9, se muestran los principales valores que se obtienen en la simulación de los cuatro modelos a evaluarse tanto técnico como económico. Se muestran cantidades de materia prima, producción total de ácido cítrico, total de residuos y el resumen de costos para el análisis económico.

**Tabla 9:** Datos técnicos y económicos de los cuatro modelos simulados

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Melaza (kg/año)	328 000	17 646 400	21 976 000	45 867 848
Agua (kg/año)	9 465 022	56 701 804	68 777 005	132 331 029
Total de materias primas (kg/año)	41 374 095	273 654 427	332 131 959	650 162 622
Tasa de producción Ac. Cítrico (kg/año)	128 526	6 914 691.48	8 611 233	17 973 185
Tasa de producción de Ac. Cítrico (ton/año)	0.128	6 914	8 611	17 973

Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

<b>Costos FOB de equipos (\$)</b>	3 505 000	7 018 000	9 693 000	11 436 000
<b>Inversión total de capital (\$)</b>	15 592 000	31 460 000	43 171 000	51 872 000
<b>Margen bruto (%)</b>	- 1 417.11	16.09	14.36	35.40
<b>Retorno sobre la inversión (%)</b>	- 17.32	11.28	10.29	24.34
<b>Tiempo de retribución (años)</b>	N/A	8.86	9.72	4.11
<b>TIR (%)</b>	N/A	8.05	6.80	21.80
<b>VAN (8%)</b>	- 34 547 000	165 000	- 3 275 000	57 009 000

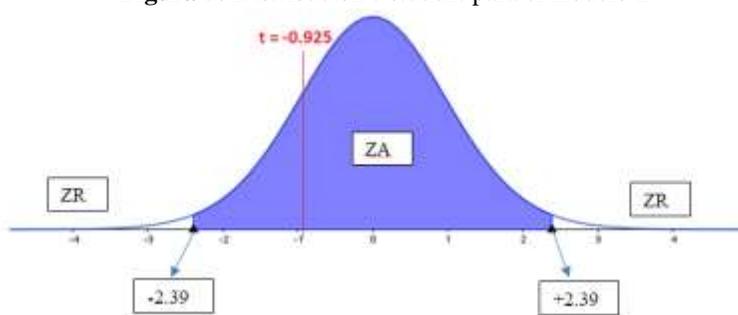
Fuente: Elaboración propia

En base a la Tabla 9, se define el modelo de simulación más óptimo y factible para la producción de ácido cítrico por vía de fermentación con el uso de *Aspergillus niger*, este modelo es el número dos, desde el punto de vista técnico y económico, es el proceso más factible al comparar con los otros tres modelos, porque se tiene una producción acorde a las necesidades del mercado, la inversión es menor y la ganancia es en un tiempo aproximado de 8 años.

**Análisis estadístico del proceso de producción viable**

Se define el modelo dos como el proceso de producción más viable, en base a éste se realiza un análisis estadístico descriptivo a partir de 25 sub-modelos de simulación en los que se varían las cantidades de fuente de carbono y agua a la entrada del proceso, que a la vez varía la cantidad final de ácido cítrico, como se muestra en la Tabla 9.

Figura 5: Distribución t-student para el modelo 2



Fuente: Elaboración propia

La Figura 5, indica que el valor que se calcula con la distribución t-student (-0.92) se encuentra en la zona de aceptación, es decir, aceptamos la hipótesis nula ( $H_0$ ) en la que se define que la media de simulación realizada en el rango (3.44 a 27.23) es igual a la media hipotética, que para este caso, se tomó al dato de producción de ácido cítrico correspondiente al mejor modelo de

## Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

simulación que es de (21.08 Ton/año). Además, el análisis estadístico es muy útil para definir la relación que existe entre la media de producción y el mejor modelo tanto económico como técnicamente definido.

Se puede observar que el modelo escogido, se encuentra entre el nivel de confiabilidad del 95%, como se planteó al inicio del estudio estadístico.

### Estimación de costos de las operaciones del proyecto

#### *Base de costos*

Los resultados de los costos presentados en esta sección se encuentran en base a costos del año 2012, en función al año de los costos encontrados en bibliografía y proveedores de equipos. Además, los costos se encuentran expresados en dólares y en precios FOB (Free On Board).

#### *Resumen de costos*

En este apartado se presenta el resumen de costos de toda la planta de producción de ácido cítrico, para lo cual cada ítem tiene un valor y se encuentra expresado en sus unidades respectivamente.

**Tabla 10:** Resumen de costos

Inversión Total de Capital	31 460 000	\$
Costo de Operación	31 460 000	\$/año
Costo neto de Operación	11 605 000	\$/año
Ingresos	13 829 000	\$/año
Tasa de Costo Base Anual	6 914 691	kg MP/año
Costo unitario de Producción	1.68	\$/kg MP
Costo neto de Producción Unitaria	1.68	\$/kg MP
Ingresos de Producción Unitaria	2.00	\$/kg MP
Margen Bruto	16.09	%
Retorno sobre la inversión	11.28	%
Tiempo de retribución	8.86	Años
TIR (Después de Impuestos)	8.05	%
VAN (con 8.0% Intereses)	165 000	\$

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 10, el flujo total de la corriente de producto final está representado por MP, mientras que el TIR corresponde a la Tasa Interna de Retorno que se refiere a la rentabilidad que genera un proyecto determinado cuando sus flujos de caja son periódicos. El VAN es el valor actual neto, que es el cálculo a valor presente, el dinero que una inversión generará en el futuro.

## Discusión de resultados

Se realizaron cuatro modelos de simulación para la producción de ácido cítrico mediante fermentación con el uso de *Aspergillus Níger*, en los cuales se varían cantidades de materia prima, tamaño de equipos, lo que permite obtener diferentes costos de producción y la inversión total de la planta.

El diseño del proceso de producción incluye dos secciones: la sección de fermentación utiliza como materia prima la melaza, que es la fuente de carbono (53 800 kg/lote) para esta etapa. A continuación, en un tanque de mezcla se diluye la melaza (42 000 kg/lote), con el fin de remover los sólidos suspendidos (Filtro) y separar los iones metálicos (columna de intercambio iónico), es necesario pasteurizar para eliminar los microorganismos no deseados y evitar la formación de otros compuestos. Al fermentador ingresa también una mezcla de sulfato de amonio y nutrientes (nitrógeno, fósforo y azufre), con el fin de mejorar el producto para la siguiente sección. Con esta mezcla que se prepara y los aditivos se realiza la fermentación en condiciones aeróbicas mediante inóculo de *Aspergillus Niger*, bajo un pH óptimo de 5.8 y una temperatura de 35°C durante cinco días, hasta obtener el producto final, almacenarlo y dirigirlo hacia la siguiente sección: la de asilamiento.

En la sección de aislamiento se elimina la biomasa, subproductos y aditivos residuales (Filtro al vacío rotatorio), obteniendo un líquido libre de sólidos (ácido cítrico), que por cristalización y secado permite obtener el ácido cítrico en forma cristalina (21 081.38 kg/lote).

Según Rivada (2008), en su estudio “Planta industrial de producción de ácido cítrico a partir de melazas de remolacha” la mejor cepa que permite el crecimiento de *Aspergillus Niger* es la ATTC 11414, en un pH ácido de 5.8 y una temperatura de 30°C, en la investigación los fermentadores operan a 35°C durante cinco días con el fin de producir la cantidad ideal de ácido cítrico.

El simulador SuperPro Designer según Cara, Gómez&Martínez en su estudio “Aplicación de SuperPro Designer en el análisis de sensibilidad en instalaciones para la producción de biocombustibles y bioproductos”, considera a esta plataforma como una herramienta de análisis de costes y emisiones, lo que la hace muy versátil para su utilización en diferentes asignaturas relacionadas con los procesos fermentativos, ambientales, energías renovables y de producción

## Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

---

química; este estudio evidencia el beneficio que representa el simulador al diseñar el proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso del hongo *Aspergillus Niger*.

La simulación permitió desarrollar cuatro modelos, de los cuales el modelo dos resultó ser el más óptimo para la producción de ácido cítrico, a este modelo se le aplicaron sub-modelaciones, con estos datos se realizó el análisis estadístico junto a una t-student (Figura 5), con una confiabilidad del 95% permitió afirmar la relación existente entre la media simulada (19.72 ton/año) y la media hipotética (21.08 ton/año), definiendo una vez más al modelo dos como el más factible, debido a que técnica como económicamente es el mejor en comparación a los otros.

Luego de analizar la inversión total de la planta para el modelo dos que es de \$ 31 460 000, el Van (Valor neto actual) que es de \$ 165 000, el TIR (Tasa interna de retorno) de 8.05% en un tiempo de retribución del capital de 8 años. Según Mete (2014), en su estudio “Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión”, manifiesta que el VAN y el TIR son necesarios para garantizar un correcto análisis financiero con el fin de asegurar la estabilidad y proyección futura de las organizaciones, en este caso los valores del VAN y TIR al ser positivos, indican que el proyecto es rentable, debido a que se recupera el capital y existe ganancia en un tiempo estimado.

El impacto ambiental que produce el proceso es amigable con el medio ambiente, se tiene 141 959 226 kg/año de residuos líquidos, orgánicos, acuosos y emisiones; los residuos provenientes de aguas de lavado son los que se encuentran en mayor cantidad (103 190 859 kg/año), por esta razón es importante tratar los residuos previo a su descarga o se puede considerar reusarlos y de esta manera disminuir la contaminación leve que provocan, el costo total para el tratamiento de residuos es de \$ 629 648, que se incluyen en la inversión total.

### Conclusiones

El diseño del proceso de producción de ácido cítrico por vía de fermentación con el uso de *Aspergillus Níger* consta de dos secciones: fermentación y aislamiento. En la sección de fermentación se encuentran trece operaciones entre filtración, mezcla, intercambio iónico y fermentación en sí; La sección de aislamiento cuenta con diez operaciones entre filtración al vacío, mezcla, cristalización y secado.

## Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

---

Se hizo la simulación del proceso de producción en cuatro modelos, de los cuales dos no son viables acorde al análisis económico (modelo 1 y 3), al reflejar el VAN (valor actual neto) negativo. El modelo cuarto requiere una inversión muy alta, es por esta razón que la mejor opción es el modelo 2, más factible y viable, se asemeja más a un proyecto real que a nivel técnico y económico se podría llevar a cabo.

Para que el proceso de producción de ácido cítrico se realice de manera adecuada se debe controlar las condiciones y variables de operación; para la sección de fermentación, las variables a tener en cuenta son: temperatura constante para la mayoría de operaciones de 25°C y a 1 atmósfera de presión. La fermentación del hongo (*Aspergillus Niger*), se da a un pH de 5.8; a una temperatura óptima de 35°C, durante cinco días; se recomienda usar 7 fermentadores para evitar cuellos de botella y lograr que el proceso sea continuo. Para la sección de aislamiento, la temperatura opera entre un rango más elevado respecto al anterior (25-110°C), y la presión es de 1 atmósfera.

La inversión total de capital para el modelo óptimo es de \$ 31 460 000; los índices de rentabilidad que se determinan son: la tasa interna de retorno (TIR) que refleja un valor de 8.05%, el Valor Actual Neto es de \$165 000; en un tiempo de retribución de 8 años, estos valores indican que el proyecto es rentable y es factible invertir.

### Referencias

1. Baker, S. (2006). *Aspergillus niger* genomics: Past, present and into the future. *Medical Mycology*, 17-21.
2. Bischof, S., Flincec, S., Budimir, A., & Kalenic, S. (2011). Cotton textiles modified with citric acid as efficient anti-bacterial agent for prevention of nosocomial infections. *Croatian Medical Journal*. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3046493/>
3. Blanch, H. W., & Clark, D. S. (1997). *Biochemical Engineering*. New York: Dekker.
4. Cara, J., Gómez, X., Martínez, E., Rosas, J., & Fernández, C. (s/f.). Aplicación de SuperPro Designer en el análisis de sensibilidad en instalaciones para la producción de biocombustibles y bioproductos. Universidad de León, Departamento de Química y Física Aplicadas, León. Retrieved from <http://www.coddiq.es/cidiq2016/wp-content/uploads/2015/02/P2.pdf>

5. Castillo, Y. (2012, 10 10). Cristalización. Retrieved from Crystallization: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/yoanacastillo/materias/ope\\_4/cristalizacion.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/yoanacastillo/materias/ope_4/cristalizacion.pdf)
6. College of Science & Tecnology. (2017). College of Science & Tecnology. Retrieved from <http://www.cst.ur.ac.rw/library/Food%20Science%20books/batch1/Food%20Processing%20Technology%20Principles%20and%20Practice,%20Second%20Edition/ch11.pdf>
7. Costa, J., Cercera, S., F., C., Esplugas, S., Mans, C., & Mata, J. (1991). Curso de Ingeniería Química. Barcelona: Editorial Reverté.
8. Coulson, J., & Richardson, J. (1982). Ingeniería Química. Barcelona: Editorial Reverté.
9. Crueger, W., & Crueger, A. (1989). Biotechnology—A Textbook of Industrial Microbiology, 2nd ed. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc.
10. Designer, E. p. (2019).
11. Direct Industry. (2019). Dircet Industry. Retrieved from <http://www.directindustry.es/prod/okawara-mfg-co-ltd-157584.html>
12. DOE/NETL-2002/1169. (2017). Retrieved from Process Equipment Cost Estimation: <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/797810-Hmz80B/native/>
13. Drake, J. (2008). Proceso de desarrollo de aplicaciones de software. Santander.
14. García, L. (2013). Distribución T-student. Perú: Universidad Nacional Federico Villareal.
15. García, M., Quintero, R., & López, A. (2004). Biotecnología Alimentaria. México D.F.: Limusa.
16. GEA Group. (2019). GEA . Retrieved from <https://www.gea.com/es/index.jsp>
17. Green Planet Technologies. (2019). Green Planet Technologies. Retrieved from Green Planet Technologies
18. Grijalbo Fernández, L. (2016). Elaboración de inventarios de focos contaminantes UF1941. La Rioja: Editorial Tutor Formación.

19. Hansen, R., & Mowen, M. (2007). Administración de costos. México D.F.: Cengage Learning Editores.
20. Hernández, A. (2003). Microbiología Industrial. San José: Universidad Estatal a Distancia.
21. Himmeblau, D. (2002). Principios Básicos y Cálculos de Ingeniería Química. México: Pearson Educación.
22. HR Engineering Co. (2019). HR Engineering Co., India. Retrieved from <https://www.indiamart.com/hr-engineering-corporation/>
23. Jagani. (2010). An Overview of Fermenter and the Design Considerations to Enhance Its Productivity. *Pharmacologyonline*, 261-301.
24. Jiménez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química. Barcelona: Editorial Reverté.
25. KINNEK. (2019). Retrieved from <https://www.kinnek.com/product/bru-gear-fermenters-brite-tanks/>
26. Kumar, A., & Jain, V. (2008). Solid state fermentation studies of citric acid production . *African Journal of Biotechnology*, 644- 650.
27. Lianhe Chemical Technology Co. (2019). Lianhe Chemical Technology Co. Retrieved from <https://www.bloomberg.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=30518319>
28. Martínez, V. (2003). Simulación de procesos en Ingeniería Química. México: Plaza y Valdes.
29. McCabe, W., & Smith, J. (2003). Operaciones básicas de Ingeniería Química. Sevilla: Editorial Reverté.
30. Mujundar, A. (2016). Handbook of Industrial Drying. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
31. Mullin, J. (1972). Crystallitation. London: Butterworth & Co.
32. Muñoz, A., Sáenz, A., López, L., Cantú, L., & Barajas, L. (2014). Acido cítrico: Compuesto interesante. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*.

33. Nonhebel, G., & Moss, A. (1979). El secado de sólidos en la industria química. Barcelona: Reverté.
34. NPTEL. (2017). NPTEL. Retrieved from [http://nptel.ac.in/courses/103104043/Lecture\\_pdf/Lecture35.pdf](http://nptel.ac.in/courses/103104043/Lecture_pdf/Lecture35.pdf)
35. Okewale, A., Igbokwe, P., & Babayemi, K. (2015). Design of Pilot Plant Packed Column for the Dehydration of Water from Ethanol-Water Mixtures. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 152-157.
36. Palacio, L., Tapias, H., & Saldarriaga, C. (2005). Métodos y algoritmos de diseño en ingeniería química. Antioquia: Universidad de Antioquia.
37. Papagianni, M. (2007). Advances in citric acid fermentation by *Aspergillus niger*: Biochemical aspects, membrane transport and modeling. *Biotechnology Advances*, 244-263.
38. Pérez, O., Ley, N., Regla, K., & González, E. (2016). Oportunidades de producción de ácido cítrico por vía fermentativa a partir de sustratos azucarados en Cuba. *Centro Azúcar*, 85-99.
39. Press Release Distribution. (2017). PRLOG. Retrieved from <http://www.prlog.org/11293569-china-citric-acid-price-trend-outlook-2011.html>
40. Rivada, F. (2008). Planta industrial de producción de ácido cítrico a partir de melazas de remolacha. Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias.
41. Roberts, L. (1979). *Encyclopedia of Chemical Processing and Design* (Vol. 8). New York: Dekker.
42. Sáez, A., Flórez, L., & Cadávid, A. (2002). Caracterización de una cepa nativa de *Aspergillus Niger* y Evaluación de la producción de ácido cítrico. *Revista Universidad EAFIT*.
43. Sánchez, O., Ortiz, M., & Betancourt, A. (2004). Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus* spp. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 43-54.
44. SBS Ayrshire Ltd. (2019). Retrieved from <http://www.sbsayrshire.com/>
45. Schuster, E., Dunn, N., & Frisvad, J. (2002). On the safety of *Aspergillus Niger*- a review. *Appl Microbiol Biotechnol*, 428-435.

Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*

---

46. Strauss, W., & Mainwaring, S. J. (2011). Contaminacion del aire / Air Pollution: Causas, efectos y soluciones. México: Editorial Trillas .
47. Vázquez, R., Miranda, M., & Muñoz, G. (2014). Balance de materia y energía de Procesos Industriales. México: Grupo Editorial Patria.
48. Weissermel, K., & Hans-Jurgen, A. (1981). Química Orgánica Industrial. Barcelona: Editorial Reverté.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.