

Artículo original

OBTENCIÓN DE INULINA A PARTIR DE PIÑAS DE HENEQUÉN

INULIN'S PRODUCTION FROM AGAVE WASTE

Daniel Llerena Rodríguez^{1*}, Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas¹, Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas²

¹Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, calle 114 no. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

²Grupo de Ingeniería Alimentaria, Facultad de Ingeniería Química Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, calle 114 no. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

danielll@quimica.cujae.edu.cu

Resumen

Las piñas de henequén representan un residuo de la industria henequenera cubana que provoca pérdidas económicas al país debido a su contenido no aprovechado de inulina, además de que contaminan el medioambiente al no tener un procesamiento antes de su vertimiento. Es por ello que el objetivo del trabajo es proponer un procedimiento para obtener la inulina industrialmente a partir de la piña del henequén, utilizando la simulación de procesos. Para realizar la simulación de una planta de obtención de inulina, que procese 1 000 kg de piñas de henequén por hora, se utilizó el programa SuperPro Designer v13.0. Se analizó el caso base y se propusieron cuatro alternativas. El modelo de simulación se verificó al comparar el resultado de algunos parámetros obtenidos en el laboratorio como la humedad final en el producto (5 %) y el contenido de inulina en el jugo concentrado (35 %), lo que daría un error relativo máximo de 6 %. Se evaluaron las alternativas y se compararon con el caso base atendiendo al costo unitario de producción, al costo de los servicios auxiliares empleados y al tiempo de recuperación de la inversión. Se comparó la composición del producto obtenido. La alternativa para la que se duplicó el flujo de materia prima y se incrementó la composición de inulina en las piñas de henequén resultó la mejor, reduciendo el tiempo de recuperación de la inversión con relación al caso base de 4,7 a 2 años, así como el costo unitario de producción (\$/kg) de 16,97 a 5,89.

Palabras clave: henequén; inulina; simulación

Abstract

Agave “pineapples” represent a waste from the Cuban agave industry that causes economic losses due to its unused inulin content. Also, environment is affected because that waste isn’t processed before discarding. For that, the objective of this work is, to propose a procedure to obtain inulin industrially from henequen pineapple, using process simulation. For the simulation of an inulin production plant, which processes 1 000 kg of henequen pineapples per hour, the SuperPro Designer v13.0 program was used. The base case was analyzed and four alternatives were proposed. The simulation model was verified by comparing the result of some parameters obtained in the laboratory such as the final humidity in the product (5 %) and (%) the inulin content in the concentrated juice (35 %) with a maximum relative error of 6 %. The alternatives were evaluated and compared with the base case according to the unit production cost, cost of the auxiliary services, and investment recovery time. The composition of the product obtained

was compared. The alternative for which the flow of raw material was doubled and the inulin composition in the henequen pineapples was increased was the best, reducing the investment recovery time in relation to the base case from 4.7 to 2 years, as well as the unit production cost (\$/kg) from 16.97 to 5.89.

Keywords: henequen; inulin; simulation

1. Introducción

La industria cubana se ha trazado la meta de depender lo mínimo posible de importaciones, para ser autosuficientes, abaratar la elaboración y competir en un mercado internacional con productos 100 % cubanos. Una de las metas actualmente es sustituir la sacarina sódica en la crema dental por un edulcorante que se pueda producir en Cuba.

Un edulcorante es aquella sustancia natural o artificial que sirve para endulzar un alimento o producto que presenta sabor amargo. Comparando edulcorantes como la sacarina sódica con la sacarosa, esta primera es 300 veces más dulce que la sacarosa, lo que le brinda ventajas en su consumo (1).

La sacarina sódica, uno de los primeros edulcorantes en ser descubierto, se ha utilizado en disímiles productos como bebidas, postres lácteos, helados, frutas y verduras procesadas, gelatinas, mermeladas, coberturas, salsas, gomas de mascar y la crema dental (1). Su uso desmedido puede provocar efectos secundarios, desde la producción de episodios repetidos de alergia generalizada, urticaria de manos y brazos con sibilancia audible y la producción de erupciones permanentes y fotosensibilidad, hasta la producción de sabor desagradable en la boca, sudoración, inestabilidad emocional, diuresis y disturbios gastrointestinales (2).

El henequén (*Agave fourcroydes Lem*), planta originaria de México, con capacidad de sobrevivir en climas adversos donde otros cultivos no podrían hacerlo, se cultiva en Cuba principalmente en la zona matancera. Constituye una planta con diversos usos y potencialidades, tales como: la extracción de fibras blancas para la confección de hilos, cordeles y otros objetos a partir de sus hojas (3), aunque no se procesa en su totalidad, dejando como residuo una parte importante de la planta, llamada piña.

En los últimos años, estudios han determinado que la piña del henequén es rica en carbohidratos. Glucosa, dextrina, almidón e inulina son aquellos que se han podido identificar que están contenidos en la piña. En particular, la inulina se encuentra en un 15- 20 % (4).

La inulina por sus antecedentes prebióticos ha sido recomendada y considerada como un ingrediente alimenticio funcional que puede ayudar a la mejora de la salud, en condiciones de ingesta de 10 a 20 g al día y con un bajo nivel calórico de 6,3 kJ/g que puede ayudar a disminuir los posibles riesgos de obesidad, cáncer y fortalecer el sistema inmune. Además, promueve la sensación de saciedad (5). Se incorpora a los alimentos como texturizador, sustituye edulcorantes artificiales como el aspartamo, la sacralosa, la sacarina y el neotamo (6), (7). La inulina mejora la estabilidad de emulsiones y espumas, especialmente cuando se incorpora en un 1-5 % (8).

Según (9) el poder edulcorante que presenta la fructosa con respecto a la sacarosa (100 %) es mayor (1,73 veces), mientras que para la inulina se reportan valores menores que para la sacarosa, variando en dependencia del grado de polimerización. Por ello, se ha sugerido que se combine con otros tipos de edulcorantes para lograr el dulzor necesario, o una vez obtenida esa

inulina someterla a otros procesos donde se obtenga una concentración predominante de fructosa, con mayor poder edulcorante que la inulina.

En Europa se produce inulina industrialmente a partir de las raíces de achicoria en un proceso que tiene un rendimiento de 16,3 %. (10). Por otra parte, los fructanos (entre ellos la inulina) son productos fotosintéticos generados por las plantas de agave. Después del almidón, son los polisacáridos no estructurales con más presencia en la naturaleza, pues se encuentran en aproximadamente el 15 % de las plantas con flores (11).

En Cuba, varios grupos se dieron a la tarea de determinar el porcentaje de inulina que existía en la planta del henequén principalmente en la piña, parte de la planta que hasta el momento se considera un residuo de la industria y no se procesa de la manera más correcta. En el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER) y en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE): se analizaron piñas de las henequeneras de los municipios Mariel (Provincia Artemisa) y Limonar (Provincia Matanzas), hoy en día las henequeneras de mayor importancia en el país (4). Se compararon a nivel de laboratorio dos métodos de extracción: por cocción y mecánico. Se determinó que el mayor rendimiento se alcanzaba por el método de extracción mecánico, comprobando que a medida que la edad de la planta aumenta, el % de inulina es mayor.

Con estos antecedentes se formuló el siguiente problema científico: Las piñas de henequén representan un residuo de la industria henequenera cubana que provoca pérdidas económicas al país debido a su contenido no aprovechado de fructooligosacáridos, además de que contaminan el medioambiente al no tener un procesamiento antes de su vertimiento. Es por ello que el objetivo del presente trabajo es proponer un procedimiento para obtener la inulina industrialmente a partir de la piña del henequén, utilizando la simulación de procesos.

2. Materiales y Métodos

2.1 Propuesta de una secuencia de operaciones para la obtención de inulina

Se partió del procedimiento de laboratorio desarrollado por Ferrer-Serrano y colaboradores (4) con el cual se alcanza un rendimiento entre 27,9 % y 29,1 % al concluir la extracción, y del procedimiento industrial reportado por Kardamanidis (10) para inulina extraída de achicoria (*Cichorium intybus L.*) y por Quisbert (12) para la obtención de inulina a partir de dalia (*Dahlia spp.*).

A partir de los procedimientos de laboratorio se homologaron las operaciones unitarias que pudieran dar respuesta a la transformación de las piñas de henequén en inulina seca. Las transformaciones pueden considerarse agrupadas en cuatro etapas: pretratamiento de las piñas, extracción del jugo, tratamiento de la pulpa de henequén y concentración y secado de la inulina.

Para facilitar el cálculo de los balances de masa y energía que permitan analizar si la obtención de inulina por esta vía es posible, se realizó la simulación del proceso.

2.2 Simulación del proceso utilizando SuperPro Designer v13.0

Para realizar la simulación de una planta de obtención de inulina, que procese 1 000 kg de piñas de henequén por hora se seleccionó el modo de operación continuo. Se empleó el programa SuperPro Designer v13.0. Para la selección de los componentes se crearon algunos componentes hipotéticos que no existen en la base de datos del simulador, como la inulina, la pulpa y otros, para representar la tierra. El contenido de fructosa se consideró junto con el de

glucosa. La composición de la corriente de entrada y otros datos requeridos para la simulación se extrajeron de los resultados de los experimentos reportados en (4) y (10). El diagrama de simulación se presenta en la Figura 1.

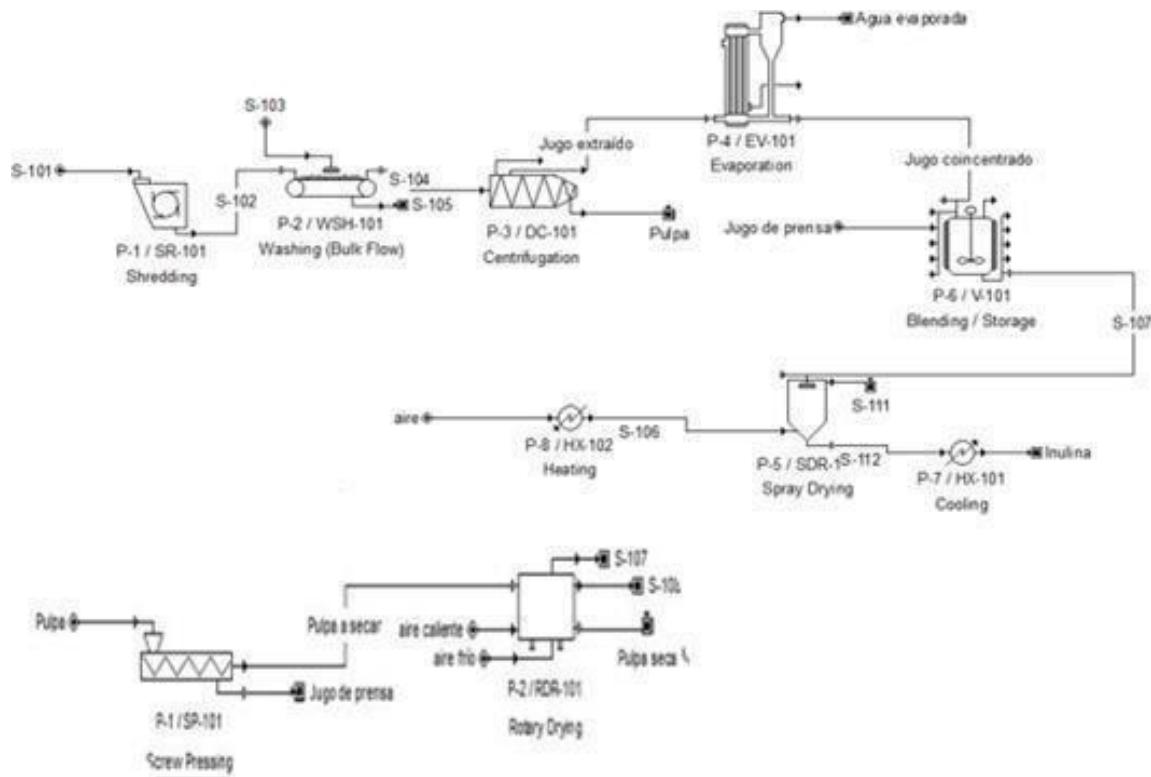


Fig. 1 Diagrama de simulación del proceso de obtención de inulina

2.3 Análisis de alternativas

Para analizar el efecto del cambio de algunas variables sobre los indicadores del proceso se plantearon cuatro alternativas:

1. Aumentar el flujo de materia prima a 2 000 kg/h.
2. Aumentar la concentración de inulina en la materia prima hasta 8,45 % .
3. Aumentar el % de agua a evaporar en el evaporador a 70 %.
4. Combinar las alternativas 1 y 2.

2.4 Análisis económico

El software permite realizar la evaluación económica del proceso simulado a partir de la base de datos de costos. El precio de venta de la inulina y de la pulpa se tomaron de (10). Para comparar las alternativas se analizaron algunos indicadores: costo unitario de producción, plazo de recuperación de la inversión y costo de servicios auxiliares.

3. Resultados y Discusión

La descripción del proceso que se corresponde con dicho diagrama parte de la recolección de las piñas. Estas se someten a un troceado representado por SR-101. Luego pasan a lavarse en un lavador (WSH-101) donde son separadas las partículas extrañas provenientes de la tierra y

las porciones de piña. Se fija una relación sólido agua 1:6 (13). En esta operación de cortado y lavado para una cantidad de 1 000 kg/h de materia prima se consumen un total de 50 kW, utilizados todos por la cortadora. Se identifica como operación de separación de naturaleza física.

El extracto obtenido del lavado se lleva hacia una centrífuga decantadora donde se aparta la materia sólida de la líquida, el proceso es llevado a cabo a 343 K y 101,3 kPa, se consumen 19,22 kW y se requiere transferir al evaporador 300 039 kJ/h aportados por vapor de agua saturado a 425 K.

La materia sólida de la piña se lleva a una prensa (SP-101) donde se le extrae el líquido que no salió por la corriente acuosa de la centrífuga. Este paso del proceso se caracteriza por ser una operación física con separación, para eliminar la parte acuosa adherida a la parte sólida de la piña y se consumen 7,03 kW.

La pulpa sólida que contiene 63,82 % de agua pasa por un proceso de secado con aire caliente hasta alcanzar un contenido de agua no ligada menor al 1 %, para ser utilizada en otros sectores como, por ejemplo, en la alimentación animal. Luego de secado el sólido, sale a una temperatura de 353 K. En el secador se consumen 2,89 kW. Mientras, el jugo extraído de la centrífuga es sometido a un proceso de evaporación para eliminar el 55 % de agua. La unión de las corrientes líquidas que salen de la centrífuga y de la prensa se unen en un tanque mezclador. Posteriormente ese concentrado se lleva a un secador (SDR-101) a 353 K para disminuir el contenido de agua (alcanzando un 5 %).

Luego de esta evaporación el producto se enfriá en un enfriador (EC-101). Los resultados de composición, temperatura y flujo de las principales corrientes de la simulación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las principales corrientes de la simulación

	S-101	S-104	Jugo extraído	Pulpa	Jugo concentrado	S-107	Pulpa seca	Inulina
Flujo (kg/h)	1 000	949,4	246,4	702,98	142,97	144,1	701,15	62,284
Temperatura (K)	303	307,6	314,9	314,9	313	313	341	305
Composición másica (%)								
ceniza	0,05	0,052	0,002	0,070	0,003	0,003	0,070	0,008
glucosa	0,10	0,104	0,398	0,001	0,685	0,683	0,001	1,597
inulina	5,45	5,683	21,677	0,077	37,362	37,245	99,837	87,009
otros	5,00	-	-	-	-	-	-	-
pulpa	70,0	73,73	-	99,57	-	-	-	-
sacarosa	0,40	0,417	1,191	0,006	2,743	2,742	0,003	6,386
agua	19,0	20,01	76,333	0,270	59,206	59,335	0,046	5,00

El modelo de simulación se verificó al comparar el resultado de algunos parámetros obtenidos en el laboratorio como la humedad final en el producto (5 %) y el contenido de inulina en el jugo concentrado (35 %) según (4) lo que daría un error relativo máximo de 6 %.

En la tabla 2 se presentan los resultados de las alternativas evaluadas, comparadas con el caso base.

Tabla 2. Comparación entre los indicadores económicos para el caso base y las alternativas

	Caso base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Producción de inulina /comp (kg/h)/ (%)	53,65 (87 %)	123,06 (87 %)	92,6 (89,7 %)	61, 66 (87 %)	184,9 (89,7 %)
Consumo de servicios auxiliares (\$)	42 000	80 000	42 000	39 000	79 000
Plazo de recuperación de la inversión (años)	4,8	2,04	4,08	4,63	1,81
Costo unitario de producción \$/kg	16,97	8,88	11,28	16,82	5,89

Como se aprecia, al aumentar el flujo de materia prima a 2 000 kg/h, con un turno de trabajo de 8 horas durante 330 días al año, se recupera la inversión en 2 años. El costo unitario de producción se reduce a la mitad. Hay una producción anual de 325 t de inulina y la posibilidad de vender 3 712 t de pulpa para alimento animal, manteniendo las características de los productos finales de caso base, pero con un aumento en su cantidad y por ende de ganancias. La aplicación de esta alternativa constituye un reto por el incremento en la logística requerida al duplicarse la materia prima necesaria, aspecto que debe tenerse en cuenta para evitar afectaciones.

El aumento de la concentración de inulina en la materia prima, o sea en la piña, depende de la edad de estas. Para una piña con una concentración de 8,45 % en inulina y 16 % en agua; la concentración de inulina en el producto final será de 89,7 % y no de 87 % como en el caso base. Para esta variante, la recuperación de inversión se estima para 4 años. La mayor calidad del producto obtenido pudiera favorecer el alcanzar un precio de venta superior.

El aumento del porcentaje de evaporación en el evaporador prácticamente no incide en los indicadores excepto en el consumo de utilidades, que se reducen globalmente al salir más seco el producto desde etapas más tempranas.

La alternativa que mayor efecto tiene en la reducción del costo unitario de producción es la 4 que combina el aumento del flujo con la mayor concentración de inulina en la materia prima. A su vez, es el que reporta un costo unitario semejante al que se obtiene para la producción de inulina de achicoria, de 5,47 \$/kg, según (10).

Existen otras alternativas que pueden ser estudiadas como la posibilidad de recuperar por condensación el agua evaporada en el evaporador para su reúso en el agua de lavado con lo cual el consumo de agua, recurso escaso, se reduciría.

Otro aspecto a analizar se relaciona con la posibilidad de aumentar la composición de inulina en el producto final para lo que se requeriría incorporar un proceso de remoción de la sacarosa

y la glucosa presenten en la corriente. La adición de hidróxido de calcio al jugo extraído, provoca que reaccione con los azúcares reductores y la sacarosa dando lugar a sales más insolubles de calcio como, por ejemplo, el sacarato de calcio y el gluconato de calcio, que se pueden separar una vez formado el precipitado.

4. Conclusiones

Se simuló en SuperPro Designer v13.0 el procedimiento propuesto para obtener inulina a partir de piñas de henequén que permite producir 162,8 t de inulina al año, con una inversión que se recupera en 4,8 años y un costo unitario de producción de \$ 16,97. Las alternativas analizadas permiten reducir este costo de producción. La secuencia de operaciones planteadas posibilita obtener una mezcla con 87 % de contenido de inulina.

Referencias

1. Larrea, V. & Hernando M. Aditivos edulcorantes intensivos, 2021. Universidad Politécnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/167345>.
2. Durán, S., Cordón K., Rodríguez MP. *Edulcorantes no nutritivos, riesgos, apetito y ganancia de peso*. Revista chilena de nutrición, 2013, 40(3): p. 309-314. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-75182013000300014&script=sci_arttext&tlang=en
3. Rodríguez I. El henequén (*Agave fourcroydes Lem.*): un cultivo promisorio en el desarrollo de una agricultura sostenible, 2016. Universidad de Matanzas. Ciencias Agrícolas. <https://rein.umcc.cu/handle/123456789/509>.
4. Ferrer-Serrano, C. M., Zumalacárregui, B., Mazorra M. *Extracción de inulina a partir de piñas de desecho de henequeneras cubanas*. Revista Cubana de Química, 2023. 35(20): p. 322-337. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212023000200322&lng=es&nrm=iso&tlang=es
5. Gupta, N., Kumar, A., Pooja, D., Kulhari, H. *Inulin: A novel and stretchy polysaccharide tool for biomedical and nutritional applications*. International journal of biological macromolecules, 2019. 132: p. 852-863. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.188
6. Saraiva, A., Carrascosa C., Raheem D., Ramos, F., Raposo, A. *Natural sweeteners: The relevance of food naturalness for consumers, food security aspects, sustainability and health impacts*. International journal of environmental research and public health, 2020. 17: p. 6285. doi: 10.3390/ijerph17176285.
7. Castro-Muñoz, R., Correa, M., Córdova, R., Lara, D., Chávez, M., Velázquez, V., Hernandez, C., Gontarek, E., Zamidi, M. *Natural sweeteners: Sources, extraction and current uses in foods and food industries*. Food Chemistry, 2022 370: 130991, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130991>.
8. Castillo-Lara, J. F. & Flores-Johnson E. *La fibra de henequén (*Agave fourcroydes*) como una opción para materiales compuestos amigables con el medio ambiente*. Desde El Herbario CICY, 2020, 12: p. 99-105. <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/2586>

9. Franck, A. *Technological functionality of inulin and oligofructose*. British Journal of Nutrition, 2002. 87(S2): p. S287-S291. <https://doi.org/10.1079/BJN/2002550>.
10. Kardamanidis, A., Misailidis, N., da Gama, R, Petrides, D. *Inulin Production from Chicory Roots*, 2024. <https://www.intelligen.com/products/superpro-examples/>.
11. Pineda-Tapia, F. J., Villarruel-López, A., Iñiguez-Muñoz, L. *Efectos de los fructanos del Agave mexicano como potencial prebiótico y su importancia en la microbiota humana* Acta de Ciencia en Salud, 2022. 16: p 39-44. <https://doi.org/10.32870/acs.v0i16.105>.
12. Quisbert, P., Desarrollo de un edulcorante nutritivo (no refinado de raíz) a base de inulina de *Dahlia* como una alternativa para la sustitución de edulcorantes comerciales, 2021. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/31056>
13. Montañez-Soto, J., Venegas, J., Vivar M. A., Ramos, E. *Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del Agave tequilana Weber azul*. Bioagro, 2011. 23(3): p199-206.https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612011000300007&lng=es&nrm=iso&tlang=es

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Contribuciones de los Autores

- Daniel Llerena Rodríguez. Realizó la simulación, el análisis de resultados y la escritura del artículo.
- Dr. C. Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas. Colaboró con el análisis de los resultados, la simulación y la revisión.
- Dr. C. Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas. Conceptualización, investigación.