

Simulation of extraction processes of β -natural carotene, astaxanthin, biodiesel and glycerol from *Dunaliella salina*

Henry Enrique López, Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas, Osney Pérez Ones*

Grupo 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 CP19390

Abstract.-

Simulation of the extraction processes for β -natural carotene, astaxanthin, biodiesel and glycerol, starting from marine microalgae (*Dunaliella salina*), is presented. Analysis of some variables behavior at different operation conditions, as well as the scale-up design is the main purpose of this paper. Values for the simulation were determined at laboratory data, because actual information at industrial scale is not available. Economic evaluation of the simulated system was done; the simultaneous extraction of β -natural carotene, astaxanthin, biodiesel and glycerol, by means of the proposed technological is feasible economically. Other seven cases studies were analyzed: extraction of β -natural carotene, astaxanthin and biodiesel, extraction of β -natural carotene and astaxanthin, extraction of β -natural carotene, astaxanthin and glycerol, extraction of β -natural carotene and biodiesel, extraction of β -natural carotene, biodiesel and glycerol, extraction of astaxanthin, biodiesel and glycerol and extraction of astaxanthin and biodiesel. The best alternative was β -natural carotene, astaxanthin and biodiesel extraction.

Keywords: extraction; β -carotene; astaxanthin; *Dunaliella salina*; biodiesel.

Simulación de los procesos de extracción de β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol a partir de *Dunaliella salina*

Resumen.-

Se presenta la simulación de los procesos de extracción de β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol a partir de una especie de microalga marina (*Dunaliella salina*), con la finalidad de facilitar el análisis del comportamiento de diferentes variables bajo distintas condiciones de operación, así como el diseño a otra escala. Los datos para la simulación fueron determinados partiendo de resultados de laboratorio, por no disponer de información a escala industrial al no existir la instalación. Se realizó la evaluación económica de la simulación del sistema planteado; se concluyó que la extracción simultánea de β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol, mediante los esquemas tecnológicos propuestos, es factible económicamente; se analizaron otros siete casos de estudios: la extracción de β -caroteno natural, astaxantina y biodiesel, la extracción de β -caroteno natural y astaxantina, la extracción de β -caroteno natural, astaxantina y glicerol, la extracción de β -caroteno natural y biodiesel, la extracción de β -caroteno natural, biodiesel y glicerol, la extracción de astaxantina, biodiesel y glicerol, la extracción de astaxantina y biodiesel, seleccionándose como la mejor variante la extracción de β -caroteno natural, biodiesel y astaxantina.

Palabras clave: extracción; β -caroteno; astaxantina; *Dunaliella salina*; biodiesel.

Recibido: diciembre 2016

Aceptado: julio 2017

* Autor para correspondencia

Correo-e: osney@quimica.cujae.edu.cu (Osney Pérez Ones)

1. Introducción

El hombre siempre se ha visto en la necesidad de iniciar nuevas líneas de investigación que lo conduzcan a dar soluciones a situaciones que se le presentan. En las últimas cuatro décadas, las microalgas han adquirido un creciente interés en diversos campos de la economía, especialmente en la industria de alimentos saludables, concentrados para animales, productos farmacéuticos y cosméticos [1, 2].

Sin embargo, el cultivo a gran escala de las microalgas no es tan eficiente comparado con el de los microorganismos heterotróficos. No obstante, el cultivo industrial de las microalgas apenas se encuentra en pleno desarrollo, estado que motiva el estudio de procesos biotecnológicos innovativos que incrementen la eficiencia productiva de los microorganismos fototróficos [3].

Las microalgas son microorganismos capaces de almacenar y producir determinadas cantidades de sustancias bioactivas muy novedosas empleadas en la industria y en la ciencia de la salud. *Dunaliella salina*, es una especie predominante en ambientes hipersalinos y una de las eurihalinas más extremófilas que se conoce. Bajo condiciones de estrés salino y alta irradiación, produce grandes cantidades de β -caroteno (14 % de su masa seca), que le permite proteger la clorofila y el ADN del núcleo; biodiesel (6-25 % de su masa seca), astaxantina (1,5-3 % de su masa seca) y glicerol [4]. Estudios han demostrado que la producción de carotenoides en esta especie de alga puede optimizarse variando las condiciones de cultivo (aumento de la salinidad, intensidad luminosa y temperatura). Como consecuencia, el aprovechamiento de esta microalga cambiará, ya sea con la finalidad de producir todos o algunos de los siguientes productos: β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol [5].

Otros estudios realizados comprueban que las microalgas pueden jugar un papel importante en la transformación de la materia orgánica de las aguas residuales en biomasa y en el agua tratada que puede utilizarse para el riego [6].

El crecimiento en los últimos años de las emisiones de gases de efecto invernadero ha

sido la preocupación y el motivo de numerosas investigaciones relacionadas con la producción de combustibles a partir de biomásas, debido a que los biocombustibles obtenidos de ellas no incrementan el dióxido de carbono (CO_2), por el consumo que tienen de este componente durante su crecimiento, siendo el balance neto igual a cero [7].

El β -caroteno es el precursor de la vitamina A y se le utiliza como suplemento alimenticio vitamínico. La producción de β -caroteno mediante *Dunaliella salina* es un medio natural de obtenerlo; su calidad es superior a la alcanzada por un método químico. Entre las diferentes propiedades de este pigmento se encuentra su carácter antioxidante. Además, se le ha asociado a la prevención o retraso de enfermedades crónicas: cáncer, arteriosclerosis, artritis, cataratas, entre otras, y se usa frecuentemente en la industria farmacéutica como colorante y nutriente [8].

En el campo de la tecnología farmacéutica, el glicerol es un disolvente de extraordinario valor, capaz de formar disoluciones concentradas imposibles de obtener con otros componentes. Algunas de estas disoluciones se emplean como medicamentos en su forma original, en tanto otras se usan para preparar diluciones acuosas o alcohólicas de baja solubilidad en estos disolventes. Entre las formas farmacéuticas que contienen glicerol en su composición se pueden citar: geles, lociones, supositorios y diferentes mezclas [9].

La astaxantina es un carotenoide que se clasifica como una xantófila y se considera un pigmento liposoluble coloreado. A diferencia de algunos carotenoides, no se convierte a vitamina A (retinol) en el cuerpo humano. En la actualidad se utiliza como pigmentante en la industria del salmón, como fotoprotector dérmico en la industria cosmética y en la industria farmacéutica y nutracéutica se utiliza por su gran capacidad antioxidante [10, 11, 12].

El biodiesel es un biocarburante líquido, definido como ésteres monoalquílicos derivados de aceites vegetales y grasas animales. Se puede obtener a partir de la transesterificación o la esterificación de ácidos grasos, debido a su bajo costo y sus ventajas físicas y químicas. Actualmente se considera una opción de energía sostenible, que,

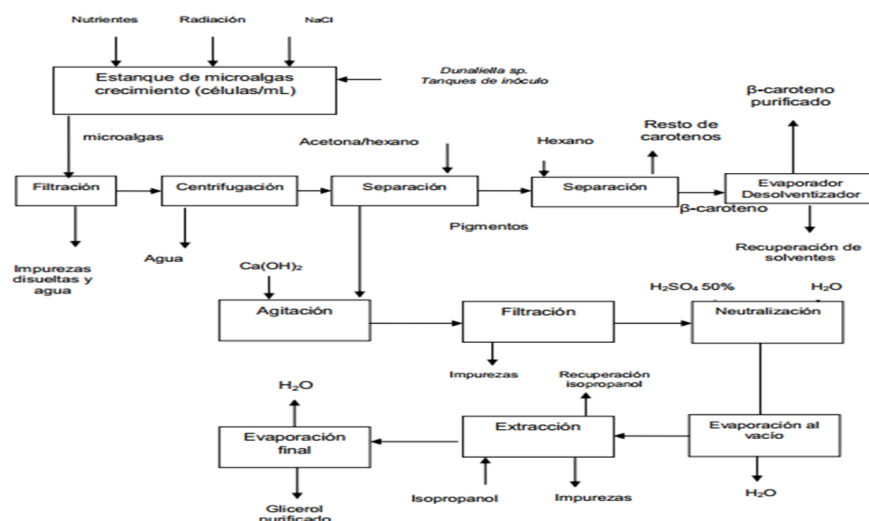


Figura 1: Esquema propuesto del proceso tecnológico para la extracción de β -caroteno natural y de glicerol a partir de una cepa *Dunaliella salina*.

de contar con ella, se reduciría el agotamiento de los recursos no renovables. Puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan estos motores convenientemente. Además, posee propiedades lubricantes que reducen el desgaste del motor y es un material seguro para su transporte [13, 14].

2. Desarrollo de la investigación

2.1. Descripción del proceso tecnológico

El flujo tecnológico a procesar de biomasa húmeda es de 2 694,74 kg para una cantidad de producto final de 78,68 kg de β -caroteno, 98,68 kg de biodiesel, 15,36 kg de astaxantina y 255,39 kg de glicerol. La simulación se realizó a partir de obtener un crecimiento máximo de la biomasa, a los 21 días para un ciclo, por lo que para 13 ciclos se consumirían 270 días. Esto permite alcanzar al año aproximadamente una tonelada de β -caroteno lo que constituía el objetivo primario de la investigación. Además, se tomó en cuenta el porcentaje que representa cada uno de los productos con relación a la biomasa seca y al porcentaje de lípidos extraídos. La fase de cultivo de la microalga no se consideró en la simulación. Se partió de tres esquemas de flujo tecnológico propuestos por Acacio [7] y Cobo [15].

El sistema propuesto para la extracción de β -caroteno natural y glicerol, así como para

la extracción de biodiesel y la extracción de astaxantina se muestran en Figura 1, Figura 2 y Figura 3 respectivamente.

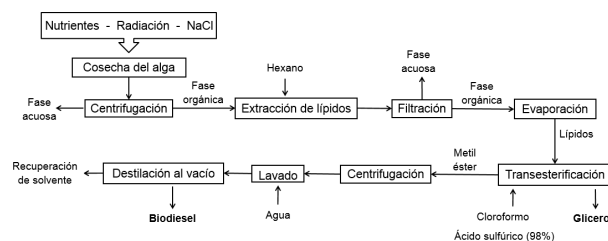


Figura 2: Esquema propuesto del proceso tecnológico para la extracción de biodiesel a partir de una cepa *Dunaliella salina*.

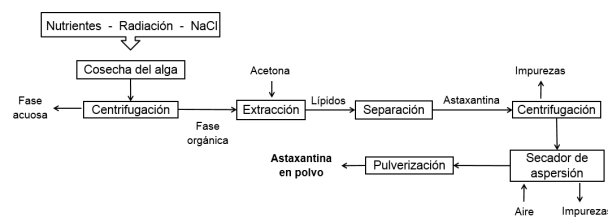


Figura 3: Esquema propuesto del proceso tecnológico para la extracción de astaxantina a partir de una cepa *Dunaliella salina*.

En los tres esquemas propuestos, el proceso se inicia con el cultivo de la especie y una vez obtenida la biomasa húmeda se filtra con el fin de eliminar la mayor cantidad de agua; luego se divide en tres líneas diferentes y se pasa a una

etapa de separación donde ocurre la extracción de los carotenoides (pigmentos y lípidos).

Para la obtención del β -caroteno natural se emplean como solventes el hexano y la acetona [16]. Posteriormente se realiza una extracción donde se obtiene el β -caroteno y por último se lleva a cabo una evaporación con el objetivo de extraer el agua de la fase acuosa y obtener el pigmento seco (Figura 1).

La obtención del biodiesel se realiza a través de la reacción de transesterificación con catálisis ácida, empleando como catalizador ácido sulfúrico al 98 % y como solvente de los ésteres monoalquílicos el cloroformo. Luego se realiza una centrifugación, se lava y finalmente se lleva a cabo una destilación al vacío con el objetivo de extraer restos de solvente y el contenido de agua, obteniendo de esta manera el biodiesel purificado [17, 15] (Figura 2).

La astaxantina se obtiene a partir de la fase orgánica (Figura 3) empleando como solvente la acetona, luego se centrifuga y con posterioridad se realiza un secado por aspersión para eliminar todo el contenido de impurezas y de agua, y obtener por último la astaxantina pulverizada [15].

La obtención de glicerol viene dada por dos partes. La primera comienza con un acondicionamiento de la mezcla (fase resultante de la extracción de carotenoides), para esto se agrega hidróxido de calcio y se enfría desde 100°C a 50°C. Se realiza la filtración, eliminando la mayor cantidad de impurezas y luego el líquido viscoso pasa al neutralizador, donde se añade ácido sulfúrico al 50 % alcanzando la mezcla un pH entre 6-7. Se lleva a cabo una evaporación al vacío donde se concentra la mezcla y luego se procede a la extracción de glicerol empleando el isopropanol como solvente. La segunda es el resultado de la reacción de transesterificación con catálisis ácida, de la que se obtiene glicerol como producto. Por último, el glicerol producido por ambas partes se lleva a un evaporador para eliminar el contenido de agua y algunas impurezas que puedan quedar y obtenerlo en su forma purificada [18].

2.2. Simulación del proceso de obtención de β -caroteno natural, biodiesel, astaxantina y glicerol a partir de una cepa de *Dunaliella salina*

Para la simulación del proceso de obtención de β -caroteno natural, biodiesel, astaxantina y glicerol a partir de una cepa de *Dunaliella salina* se empleó el programa SuperPro Designer 9.0. La simulación se realizó en modo discontinuo, donde a cada módulo seleccionado se le fijó un tiempo de carga y descarga y la cantidad de ciclos por lote, además del tiempo de proceso. También se introdujeron valores de capacidad, potencia, materias primas, costos, entre otros.

El esquema del proceso tecnológico se conformó seleccionando las operaciones que se requerían, así como los módulos correspondientes a estas. Luego de seleccionados todos los componentes que intervienen en el proceso, se introdujeron los datos de las corrientes de entrada de las materias primas. Todas las corrientes se encuentran a 25° C y 101,3 kPa. En la Tabla 1 se reporta la masa correspondiente a cada corriente.

Tabla 1: Datos de las corrientes de entrada.

Corriente	Cantidad (kg)
Biomasa húmeda	2 694,74
Biomasa seca	1 536,00
Hidróxido de calcio	106,70
Acetona	296,63
Hexano	310,17
Isopropanol	404,21
Ácido sulfúrico (50 %)	285,00
Cloroformo	585,84
Ácido sulfúrico (98 %)	146,86

3. Análisis y discusión de resultados

3.1. Resultados obtenidos a partir de la simulación

El esquema del proceso tecnológico obtenido en la simulación se presenta en la Figura 4.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en la simulación para un ciclo y el porcentaje de error respecto a los valores experimentales.

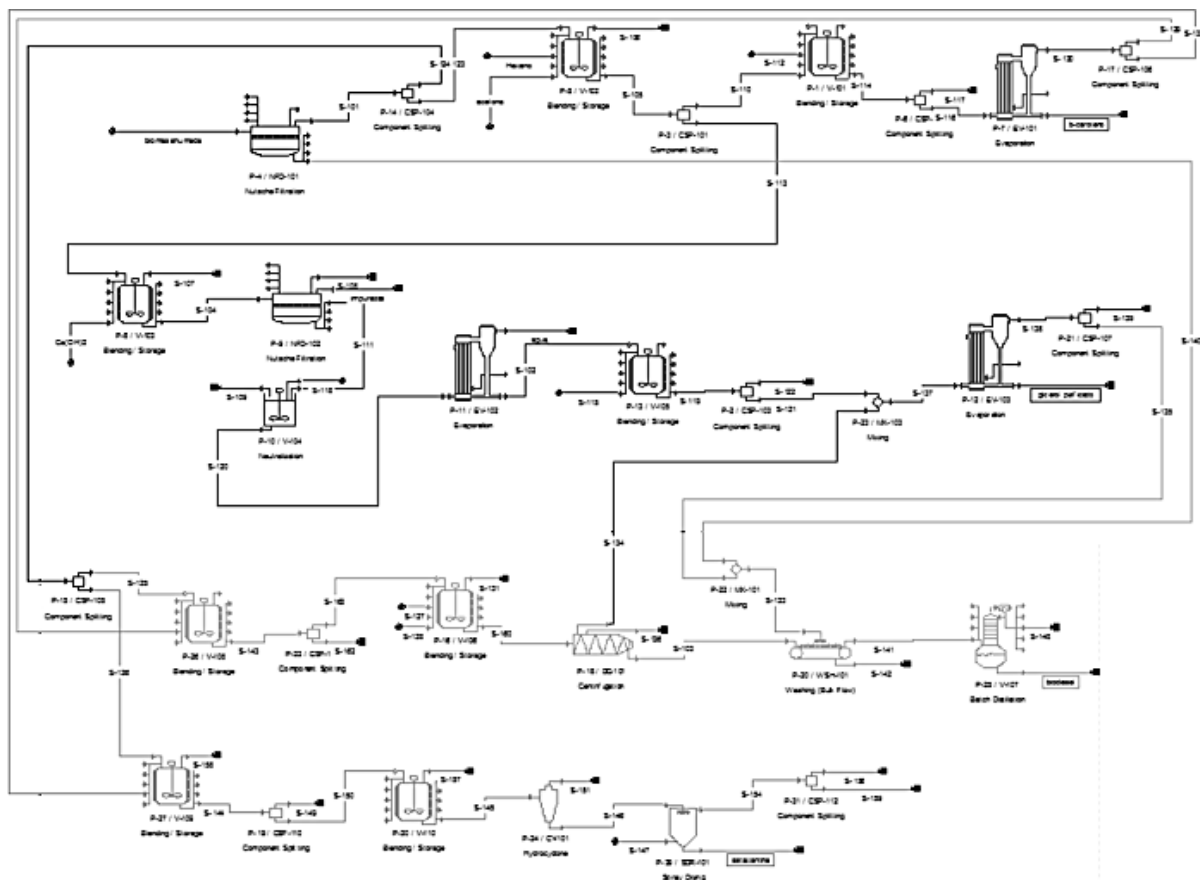


Figura 4: Esquema de la simulación para la extracción de β -caroteno natural, biodiesel, astaxantina y glicerol a partir de una cepa *Dunaliella salina*.

Comparando los valores de la Tabla 2 (experimentales y simulados), se puede decir que la simulación realizada se corresponde con las investigaciones desarrolladas con un error relativo permisible menor que el 6 % para cada uno de los elementos mostrados.

En la Figura 5, correspondiente al diagrama de Gantt, se muestra la secuencia de cada proceso, así como las operaciones involucradas en cada uno de ellos con los tiempos de carga, arranque y proceso, alcanzando un total de 17,98 h/ciclo y logrando garantizar la integridad de los tiempos debido a que se realizan procesos y operaciones de forma simultánea, contribuyendo a un ahorro de consumo energético y disminución del costo de producción asociado al proceso general.

Se realizó un gráfico (Figura 6) para analizar los tiempos de parada, espera y trabajo de los equipos empleados en el proceso de extracción, siendo el filtro (empleo en la obtención de la biomasa

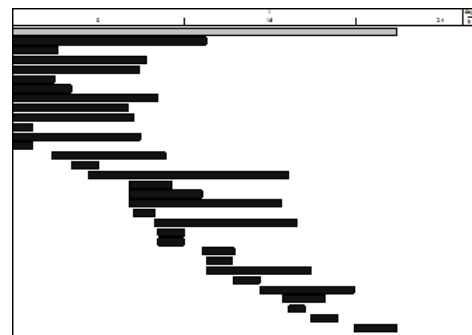


Figura 5: Diagrama de Gantt.

algal seca) y los evaporadores los que presenta la mayor fracción de tiempo ocupada, coincidiendo con los equipos que mayor costo de adquisición presentan y los mezcladores y separadores de flujo la mayor fracción de tiempo desocupada.

Se identificó como cuello de botella el proceso realizado en el evaporador (EV-102), asociado a la extracción de glicerol a partir de la fase

Tabla 2: Resultados de la simulación para un ciclo de producción y porcentaje de error respecto a los valores experimentales.

Elementos	Experimental (kg)	Simulación (kg)	Error relativo (%)
Pigmentos totales en la línea de obtención de β caroteno	183,24	174,08	5,20
Lípidos totales en la línea de obtención de astaxantina	105,22	101,55	3,50
Lípidos totales en la línea de obtención de biodiesel	110,24	107,64	2,40
Pigmentos totales en la línea de obtención de glicerol	355,71	337,90	5,27
Producción de biodiesel	100,34	98,68	1,68
Producción de astaxantina	14,80	15,23	2,90
Producción de β caroteno	77,80	78,68	1,13
Producción de glicerol	250,32	255,40	2,03

resultante de la obtención de pigmentos totales para la extracción de β -caroteno natural. En este proceso se emplea un tiempo de 9,33 h para concentrar la mezcla antes de realizar la separación de los pigmentos restantes con isopropanol y se inicia a las 3,58 h de comenzar la etapa de filtrado de la biomasa húmeda, para un tiempo final de 12,92 h. El tiempo que se requiere para esta operación es relativamente alto, lo que afecta de manera negativa el proceso general, influyendo directamente en el consumo energético y los costos de producción.

En la Figura 6 se identifica de forma abreviada el equipamiento utilizado. Así, NFD representa la filtración, MX representa la mezcla de corrientes (unión), EV representa la operación de un evaporador, V representa la operación de mezclado en un tanque y CSP representa la separación (divisor) de corrientes. El número que acompaña a cada equipo se corresponde con el de la Figura 4.

Un análisis medioambiental de los desechos acuosos y orgánicos que se generan en los procesos y las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, demuestran la necesidad de recuperar los solventes asociados a cada una de las

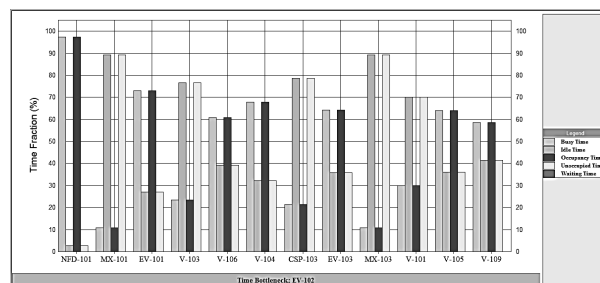


Figura 6: Gráfica de fracciones de tiempo del equipamiento.

extracciones realizadas en los procesos (hexano, isopropanol, cloroformo y acetona), debido a que la reutilización de estos podría disminuir los daños desde el punto de vista medioambiental y los costos del proceso.

El índice total de desechos por materia prima es de 0,85, con un índice de desechos acuosos y orgánicos de 0,40 y 0,44 respectivamente y 0,01 para las emisiones. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de este análisis.

Tabla 3: Total de desechos acuosos, orgánicos y las emisiones de gases contaminantes.

Componente	kg/ciclo	kg/año	%
Acetona	2,010	1 702	0,04
Hidróxido de calcio	0,001	1	0,00
Caroteno	95,386	80 792	2,10
Sulfato de calcio	196,062	166 064	4,32
Cloroformo	365,453	309 539	8,05
Glicerina	53,420	45 247	1,18
Hexano	310,170	262 714	6,83
Isopropanol	942,000	797 874	20,76
Pigmentos	23,652	20 033	0,52
Ácido sulfúrico	145,175	122 963	3,20
Restos	1 049,114	888 599	23,12
Oxígeno	1,103	934	0,02
Nitrógeno	3,634	3 078	0,08
Agua	1 351,183	1 144 426	29,77
Total	4 538,332	3 843 967	100

3.2. Análisis económico

Para el cálculo del costo de inversión se tuvo en cuenta el costo de adquisición del equipamiento tecnológico, considerando los parámetros característicos de los equipos y utilizando los indicadores que aparecen incorporados en SuperPro Designer 9.0 y que se adecuan a los reportados por Peters [19]. Los egresos se calcularon a

partir del balance de materiales considerando las materias primas requeridas (H_2SO_4 , isopropanol, $Ca(OH)_2$, hexano, acetona, cloroformo) y los servicios auxiliares (agua, electricidad) y los ingresos se calcularon a partir de la posibilidad de vender el β -caroteno natural, la astaxantina, el biodiesel y el glicerol obtenido. Se utilizó una tasa de interés del 12 %, una tasa impositiva del 30 %, todo esto para un tiempo de vida económica de 5 años.

Caso base: obtención de β -caroteno natural, biodiesel, astaxantina y glicerol.

En la Tabla 4 se muestra el costo de adquisición del equipamiento tecnológico (CAET) para la obtención de β -caroteno natural, biodiesel, astaxantina y glicerol.

Las Tablas 5, 6 y 7 muestran los egresos, ingresos e indicadores económicos para el caso base.

Tabla 4: Costos del equipamiento tecnológico.

Módulos	Cant	Capacidad	Costo unitario (\$/unidad)	Costo (\$)
Filtro Nutche	2	14,34 m ²	340 000	680 000
Tanque de mezclado	8	2 m ³	217 000	868 000
		1 m ³	209 000	627 000
		10 m ³	276 000	276 000
Evaporador kettle	3	25,06 m ²	182 000	182 000
		66,33 m ²	296 000	296 000
		111,00m ²	420 000	420 000
Destilador al vacío	1	500 L	548 000	548 000
Centrífuga	1	1 100 L/h	288 000	288 000
Hidrociclón	1	6 L/h	3 000	3 000
Lavadora	1	1 000 kg/h	-	-
Secador spray	1	1 L	111 000	111 000
Separador de componentes	10	600-1 600 kg/h	-	-
Mezclador de componentes	2	1 100-1 700 kg/h	-	-
Total			2 925 000	4 334 000

Como se aprecia los indicadores económicos son favorables de donde es posible la producción combinada de estos cuatro productos.

Para conocer si esta resultaba la mejor variante desde el punto de vista económico se analizaron siete casos de estudio a partir el caso base.

Caso de estudio 1. Obtención de β -caroteno natural, astaxantina y biodiesel.

Tabla 5: Egresos asociados a la extracción de β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol.

Materiales	Costo unitario (\$/unidad)	Cantidad anual	Costo anual (\$/año)	%
Biomasa	0,26	1 300 994	338 258	3,2
Cloroformo	1,01	496 208	501 169	4,8
Agua	0,19	981 451	186 476	1,8
Hexano	4,46	262 714	1 171 704	11,2
Acetona	3,10	251 246	778 861	7,5
Ácido sulfúrico (50 %)	7,92	241 395	1 911 848	18,3
Ácido sulfúrico (98 %)	7,92	124 390	985 172	9,4
Isopropanol	5,60	797 874	4 468 094	42,8
Hidróxido de calcio	1,18	90 375	106 642	1,0
Aire	-	1 701	-	-
Total			10 448 224	100
Electricidad	83 352,50 \$/año	833 525 kW-h/año		

Tabla 6: Ingresos por ventas asociados a la extracción β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol.

Elemento	Cantidad (kg/año)	Precio unitario (\$/kg)	Venta (\$/año)
β -caroteno	66 639	750	49 979 173
Astaxantina	13 011	900	11 709 527
Biodiesel	83 583	10	835 832
Glicerol	216 320	1	216 320
Total			62 740 851

Tabla 7: Indicadores económicos asociados a la extracción de β -caroteno natural, astaxantina, biodiesel y glicerol.

Indicador	Valor
Costo de inversión	42 776 000 \$
Valor actual neto (VAN con 12 % de tasa de interés)	109 349 000 \$
Tasa interna de rendimiento (TIR)	45,39 %
Plazo de recuperación del capital (PRC)	1,41 años
Retorno sobre la inversión (RSI)	71,01 %

Caso de estudio 2. Obtención de β -caroteno natural y astaxantina.

Caso de estudio 3. Obtención de β -caroteno natural, astaxantina y glicerol.

Caso de estudio 4. Obtención de β -caroteno natural y biodiesel.

Caso de estudio 5. Obtención de β -caroteno natural, biodiesel y glicerol.

Caso de estudio 6. Obtención de astaxantina y biodiesel.

Caso de estudio 7. Obtención de astaxantina, biodiesel y glicerol.

Para cada caso de estudio (CE) y siguiendo el procedimiento presentado para el caso base, se obtuvieron los resultados de la Tabla 8.

Tabla 8: Indicadores económicos de cada alternativa y del caso base.

	CE-1	CE-2	CE-3
CAET \$	2 750 000	1 480 000	3 064 000
Egresos \$	4 138 729	2 604 415	9 034 916
Ingresos \$	64 222 364	63 436 000	61 709 992
Inversión \$	28 274 000	18 026 000	32 535 000
VAN \$	161 923 000	182 956 000	129 205 000
TIR %	73,2	103,2	58,83
PRC años	0,75	0,45	1,01
RSI %	134,12	221,94	99,07
	CE-4	CE-5	CE-6
CAET \$	2 218 000	3 797 000	1 837 000
Egresos \$	4 129 788	10 522 875	4 828 593
Ingresos \$	51 194 869	51 031 324	12 886 024
Inversión \$	22 730 000	37 264 000	21 618 000
VAN \$	129 929 000	78 362 000	-5 891 000
TIR %	73,2	40,55	-
PRC años	0,75	1,61	-
RSI %	133,81	61,97	-
	CE-7	Caso base	
CAET\$	3 914 000	4 334 000	
Egresos \$	10 736 106	10 531 579	
Ingresos \$	12 761 679	62 740 851	
Inversión \$	37 650 000	42 776 000	
VAN \$	-72 986 000	109 349 000	
TIR %	-	45,39	
PRC años	-	1,41	
(RSI %)		71,01	

CE-n: caso de estudio n.

Los resultados de la Tabla 8 permiten seleccionar cuál de las alternativas propuestas es la más conveniente a emplear, ya que no todas son económicamente ventajosas. Si se toman en cuenta los indicadores del VAN y la inversión, el segundo caso de estudio sería la mejor alternativa, sin embargo, esta presenta una TIR muy elevada, por la gran diferencia que existe entre ganancia e inversión y el corto plazo de recuperación del

capital. Por tanto, la alternativa seleccionada es la de producir β -caroteno natural, astaxantina y biodiesel (CE-1) con un valor de TIR mayor que la tasa de interés, para un PRC menor en comparación con las otras alternativas.

Se puede observar cómo las alternativas que tienen glicerol como producto final (caso base y casos de estudio 3 y 5) aunque factibles, tiene los mayores PRC y menores RSI, lo que está asociado al bajo porcentaje de extracción asociado al procedimiento propuesto en la literatura para la obtención del glicerol.

3.3. Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de profundizar en el análisis económico de la alternativa de mayor factibilidad se realizó un análisis de sensibilidad. Como variable independiente se seleccionó el porcentaje de extracción de β -caroteno natural (40 %, 45 % y 50 %), astaxantina (5 %, 10 % y 15 %) y biodiesel (25 %, 30 % y 35 %) y como variables dependientes el VAN y los ingresos totales. En la Figura 7 se muestra la relación que existe entre las variables dependientes y las independientes.

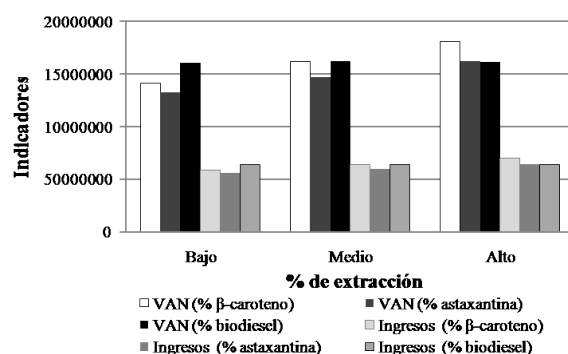


Figura 7: Gráfico del análisis de sensibilidad.

Se observa que las dos variables dependientes son directamente proporcionales a las variaciones de los porcentajes de extracción en el caso del β -caroteno natural y de la astaxantina, ambas presentan un comportamiento lineal, siendo el indicador del VAN el que presenta una mayor sensibilidad a estos cambios debido a que tiene mayor pendiente. Sin embargo, para el caso del biodiesel, cambios en el porcentaje de extracción

no influyen ni en el valor del VAN ni en los ingresos.

Para el caso de estudio seleccionado, la posibilidad de obtener solamente β -caroteno natural y biodiesel, manteniéndose parada la línea de obtención de astaxantina, resulta económicamente ventajosa, con una ganancia que equivale a 52 194 869 \$ para un costo de inversión de 28 274 000 \$.

4. Conclusiones

De la simulación de los procesos de extracción de β -caroteno natural, biodiesel, astaxantina y glicerol a partir de la microalga *Dunaliella salina* se obtuvo como resultado: 78,68 kg/ciclo de β -caroteno natural, con un error relativo de 1,13 %, 97,86 kg/ciclo de biodiesel con un error relativo de 2,50 %, 15,23 kg/ciclo de astaxantina con un error relativo de 2,90 % y 255,40 kg/ciclo de glicerol con un error relativo de 2,03 % con respecto a los valores hallados de forma experimental.

De las alternativas económicas evaluadas se seleccionó como la más rentable aquella en la que se produce β -caroteno natural, biodiesel y astaxantina.

El análisis económico de la alternativa de β -caroteno natural, biodiesel y astaxantina tiene como indicadores: un VAN de 161 923 000 \$, una TIR de 73,20 %, un RSI de 134,12 %, para 0,75 años de PRC.

El análisis de sensibilidad arroja que el porcentaje de extracción de β -caroteno natural y de astaxantina influyen en el VAN y en los ingresos, pero mayormente en el VAN. Sin embargo, cambios en el porcentaje de extracción de biodiesel no influyen ni en el valor del VAN ni en los ingresos.

Referencias

- [1] Indira Priyadarshani and Biswajit Rath. Commercial and industrial applications of micro algae – a review. *Journal of Algal Biomass Utilization*, 3(4):89–100, 2012.
- [2] Virginie Mimouni, Lionel Ulmann, Virginie Pasquet, Marie Mathieu, Laurent Picot, Gael Bougaran, Jean-Paul Cadoret, Annick Morant-Manceau, and Benoit Schoefs. The potential of microalgae for the production of bioactive molecules of pharmaceutical interest. *Current pharmaceutical biotechnology*, 13(15):2733–2750, 2012.
- [3] Niels-Henrik Norsker, Maria J Barbosa, Marian H Vermuë, and René H Wijffels. Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnology advances*, 29(1):24–27, 2011.
- [4] Ami Ben-Amotz, Jürgen E.W. Polle, and D.V. Subba Rao, editors. *The alga Dunaliella : biodiversity, physiology, genomics and biotechnology*. CRC Press, 2009.
- [5] Miguel Guevara, César Lodeiros, Olga Gómez, Nathalie Lemus, Paulino Núñez, Lolymer Romero, Aléikar Vásquez y Néstor Rosales. Carotenogénesis de cinco cepas del alga *dunaliella* sp.(chlorophyceae) aisladas de lagunas hipersalinas de Venezuela. *Revista de biología tropical*, 53(3-4):331–337, 2005.
- [6] Juan Jacobo Jaramillo Obando. Evaluación tecnológica de la producción de biocombustibles a partir de microalgas. Tesis de Maestría, Maestría en Ingeniería-Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2011.
- [7] Noel Acacio Chirino. Desarrollo de un procedimiento para la extracción de β -caroteno y glicerol a partir de *dunaliella* sp. en la salina las cumaraguas. Tesis de Maestría, Facultad De Química, Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Cuba, 2014.
- [8] F. Rodríguez. Aplicaciones del β -caroteno y el glicerol en la industria. In *IV Congreso Iberoamericano Virtual de Acuicultura (CIVA)*, España, 2006.
- [9] J. G. Naim. *Solutions, emulsions, suspensions and extractives. Remington's pharmaceutical sciences*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, 1991.
- [10] Martin Guerin, Mark E Huntley, and Miguel Olaizola. Haematococcus astaxanthin: applications for human health and nutrition. *Trends in Biotechnology*, 21(5):210 – 216, 2003.
- [11] Yousry M. A. Naguib. Antioxidant activities of astaxanthin and related carotenoids. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(4):1150–1154, 2000.
- [12] Raúl Ignacio Aravena Contreras. Extracción de astaxantina de haematococcus pluvialis usando CO_2 supercrítico. Tesis de Maestría, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2011.
- [13] A Garibay-Hernández, R Vázquez-Duhalt, M d Sánchez Saavedra, L Serrano Carreón, and A Martínez Jiménez. Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3):38–61, 2009.
- [14] A. Robles-Medina, P. A. González-Moreno, L. Esteban-Cerdán, and E. Molina-Grima. Biocatalysis: Towards ever greener biodiesel production. *Biotechnology Advances*, 27(4):398 – 408, 2009.
- [15] J. Cobo. Viabilidad de la implementación de sistemas de producción de aceites con microalgas marinas. Trabajo Especial de Grado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, 2012.

- [16] Noel J. Acacio-Chirino, Lourdes M Zumalacárregui-de Cárdenas, Johemar C Almera-Medina, Dilia M Barreno-Medina, Rosa A Betancourt-Betancourt, Raffmery L Colina-Luchón, and José A Araujo-Blanco. Desarrollo de un procedimiento para la extracción de β -caroteno y glicerol a partir de la microalga *dunaliella* sp. en la salina las cumaraguas. *Revista Cubana de Química*, 25(2):214–228, 2013.
- [17] Marcelo G. Montes D'Oca, Carolina V. Viëgas, Juliana S. Lemões, Eriksen K. Miyasaki, Joaquín A. Morón-Villarreyes, Ednei G. Primel, and Paulo C. Abreu. Production of fames from several microalgal lipidic extracts and direct transesterification of the *chlorella pyrenoidosa*. *Biomass and Bioenergy*, 35(4):1533 – 1538, 2011. Socioeconomic Dimensions of US Bioenergy.
- [18] Lisethy Hernández Nazario, María Magdalena Quintana Cabrales y Humberto Joaquín Morris Quevedo. Obtención de glicerol a partir de la microalga *dunaliella* salina. *Revista Cubana de Farmacia*, 34(2):134–137, 2000.
- [19] Max Peters, Klaus D. Timmerhaus, and Ronald E. West. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, New York, 5th edition, 2003.