

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA  
DE PRODUCCIÓN DE COLORANTES Y ANTIOXIDANTES A PARTIR DE  
MICROALGAS EN COLOMBIA

JOHAN ANDRÉS MORALES CARVAJAL  
RAFAEL JOSÉ VILLABONA NUNCIRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2017

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA  
DE PRODUCCIÓN DE COLORANTES Y ANTIOXIDANTES A PARTIR DE  
MICROALGAS EN COLOMBIA

JOHAN ANDRÉS MORALES CARVAJAL  
RAFAEL JOSE VILLABONA NUNCIRA

Trabajo de grado como requisito para optar el título de:  
Ingeniero Químico

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira  
M.Sc Ingeniería Química

Codirector

Andrés Fernando Barajas Solano  
Ph.D en Ingeniería Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2017

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

*A mi madre Martha, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien y principalmente por su amor. Por ser el ejemplo a seguir y brindarme varios espejos que hicieron reflexionar ciertas etapas de mi vida.*

*A mi padre José, por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

*A mis abuelos María Luisa, Blanca Nieves y José Grineldo, que por su madurez y experiencia me enseñaron valores y el cómo defender mi pensamiento y mis ideales ante cualquier persona y situación.*

*A mi compañero de tesis Rafael, por la paciencia que tuvo al lidiar conmigo, a las risas, a las recochas, al tiempo de gym y momentos de esparcimiento.*

*Un agradecimiento muy especial a los profesores Crisóstomo Bajaras y Andres Barajas quienes como directores del presente trabajo, me han brindado un apoyo incondicional, colaborando en todo momento con su orientación demostrando en todo momento su confianza y calidad de docente.*

*A mis compañeras de apto Angie, Natalia y Lorena por regalarme esa amistad incondicional, los consejos, las diversiones y alegrías. Por su tiempo para escucharme y ayudarme en mis malas situaciones.*

*A mis amigas, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo incondicionales: Carol, Isabel, Juliana, Sofía y Daniela.*

JOHAN ANDRES MORALES CARVAJAL

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo a Dios y Virgen María por brindarme fortaleza y perseverancia para terminar la carrera.

A mi papa Rafael, por ser mi héroe y ejemplo a seguir siempre adelante sin importar los obstáculos que se presenten, por su conocimiento académico y apoyo incondicional.

A mi mama Martha, por su paciencia, amor, cariño incesable y regaños que me han forjado para ser la persona con valores y principios que siempre ella procuro.

A mi abuela Teresa, el cariño y amor incondicional que siempre recibí.

A mis tíos Adriana, Juan, Cesar y Javier, por estar siempre estar ahí para escucharme y ayudarme en mi crecimiento personal e intelectual.

A mi hermano Daniel, por llegar a acompañarme y ser alguien con quien siempre contare.

A Johan mi compañero de proyecto, por soportarme, brindarme su amistad y apoyo sincero, brindándome disciplina para terminar el proyecto.

A los profesores Crisóstomo Bajaras y Andrés Fernando Barajas que en calidad de directores aportaron todo su conocimiento y apoyo incondicional para la culminación de este; con una excelente calidad humana y académica.

A mis amigos de toda la vida Laura, Julián, Nicolás, Mayita y Gabriel; por estar siempre ahí a pesar de la distancia y de los años brindándome su amistad, consejos y risas.

A mis compañeros de la carrera Daniela, Sofía, Paola, Natalia, María Isabel, Juliana y Carol; por su amistad y apoyo durante la carrera en la cual cada una dejo huella.

**Rafael José Villabona Nuncira**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS .....	20
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.2. EVALUACIÓN DEL MERCADO DE CAROTENOIDES.....	21
2.3. PLATAFORMA EnAlgae.....	22
2.3.1. Condiciones de operación del Simulador .....	22
2.3.2. Escenarios .....	22
2.3.3. Modificación del Software .....	22
2.4. ANÁLISIS FINANCIERO.....	23
2.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	23
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	24
3.1. MERCADO DE CAROTENOIDES.....	24
3.2. PLATAFORMA EnAlgae.....	24
3.2.1. Condiciones de operación del simulador.....	24
3.2.2. Escenarios .....	25
3.2.3. Modificación del Software .....	27
3.3. ANÁLISIS FINANCIERO.....	40
3.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	43
4. CONCLUSIONES .....	46
5. RECOMENDACIONES .....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXOS.....	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Flujo metodología .....	21
Figura 2. Diagrama de Flujo para la producción y extracción de $\beta$ -caroteno.....	28
Figura 3. Diagrama de flujo para la producción y extracción de Astaxantina ....	29

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Costos de electricidad, agua y terreno para las 5 ciudades.....	41
Tabla 2. Costo de capital (FCI), Costo de materias primas ( $C_{RM}$ ) y costos de servicios industriales ( $C_{UT}$ ) para $\beta$ -caroteno .....	42
Tabla 3. Costo de capital (FCI), Costo de materias primas ( $C_{RM}$ ) y costos de servicios industriales ( $C_{UT}$ ) para Astaxantina.....	42

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Datos de Irradiación global, Temperatura Promedio, precipitación y evaporación promedio. ....	55
ANEXO B. Reactivos del medio Johnson J/1 .....	58
ANEXO C. Explicación del modelo foto autotrófico .....	60
ANEXO D. Parámetros usados en el modelo de producción de Biomasa. ....	71
ANEXO E. Especificaciones técnicas del filtro .....	76
ANEXO F. Especificaciones del equipo de extracción supercrítica con CO <sub>2</sub> ....	81
ANEXO G. Descripción del proceso. ....	83
ANEXO H. Costos de los equipos para el cálculo del FCI. ....	85
ANEXO I. Cotización de los reactivos involucrados en el medio Johnson J/1 ...	86

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE COLORANTES Y ANTIOXIDANTES A PARTIR DE MICROALGAS EN COLOMBIA.\*

**AUTORES:** JOHAN ANDRÉS MORALES CARVAJAL, RAFALE JOSE VILLABONA NUNCIRA\*\*

**PALABRAS CLAVES:**  $\beta$ -CAROTENO, ASTAXANTINA, CULTIVO DE MICROALGAS, COSECHA DE MICROALGAS, EXTRACCIÓN SUPERCRÍTICA.

### DESCRIPCIÓN:

Este estudio se basó en la simulación del cultivo, cosecha y extracción de colorantes y antioxidantes a partir de las microalgas *D. salina* ( $\beta$ -caroteno) y *H. pluvialis* (Astaxantina) en cinco ciudades colombianas.

El cultivo simulado se realiza en un sistema híbrido conformado por un panel plano PBR, seguido de un fotobiorreactor abierto (*open pond*) en el cual se inhibe el crecimiento celular; para *D. salina*, con un medio hipersalino a 4 M, y para *H. pluvialis*, aumentando la radiación hasta un rango de 200 a 1.250  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Posteriormente, se implementa una centrifuga para retirar la mayor parte del agua, la cual se fracciona entre un sistema de filtrado y el mecanismo de recirculación. La torta de algas pasa a un proceso de secado, donde se le retira el 5% de agua restante, y continúa hacia un sistema de disrupción celular en un molino de bolas para el caso de *H. pluvialis*. Finalmente, se procede a la extracción supercrítica con  $\text{CO}_2$ , a partir de unas condiciones de trabajo definidas de presión (25-45 Mpa), temperatura (50-65 °C) y tiempo (2 h).

A este sistema le fue estudiada su factibilidad financiera a partir del cálculo de FCI,  $C_{RM}$ ,  $C_{UT}$ ,  $C_{OL}$  y  $C_{WT}$ , así como con el análisis del flujo de caja simulado, lo que permitió definir VPN, TIR, ROI y PB. La locación más factible para ambos productos fue Santa Marta, con factibilidad satisfactoria en términos de VPN (€ 4'428.442), TIR (44%), ROI (133%) y plazo de recuperación (3,8 años) para una concentración de  $\beta$ -caroteno al 10%; y VPN (€ 5'529.203), TIR (50%), ROI (158%) y plazo de recuperación (1,9 años) para una concentración de Astaxantina al 5%.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector Andrés Fernando Barajas Solano

## ABSTRACT

TITLE: STUDY OF TECHNICAL-ECONOMIC PREFABILITY OF A SYSTEM OF PRODUCTION OF DYES AND ANTIOXIDANTS FROM MICROALGAS IN COLOMBIA \*

AUTHOR: JOHAN ANDRÉS MORALES CARVAJAL, RAFALE JOSE VILLABONA NUNCIRA \*\*

KEYWORDS: B-CAROTENE, ASTAXANTHIN, MICROALGAE CULTURE, MICROALGAE HARVEST, SUPERCRITICAL EXTRACTION.

### DESCRIPTION:

This study was based on the simulation of the culture, harvesting, and extraction of colorants and antioxidants from *D. salina* ( $\beta$ -carotene) and *H. pluvialis* (Astaxanthin) microalgae in five Colombian cities.

The simulated culture is performed in a hybrid system comprised of a PBR flat panel, followed by an open pond photobioreactor in which cell growth is inhibited; for *D. salina*, with a hypersaline medium at 4 M, and for *H. pluvialis*, by increasing the radiation to a range of 200 to 1,250  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Subsequently, a centrifuge is implemented to remove most of the water, which culminates divided between a filtration system and the recirculation mechanism. The algae cake goes to a drying process, where 5% of the remaining water is removed, and continues to a cellular disruption system in a ball mill for the case of *H. pluvialis*. Finally, supercritical extraction with  $\text{CO}_2$  is performed, at defined working conditions of pressure (25-45 Mpa), temperature (50-65 °C) and time (2 h).

Financial feasibility of this system was studied based on the calculation of FCI, CRM, CUT, COL and CWT, and by the analysis of a simulated cash flow, using the VPN, IRR, ROI and PB indicators. The most feasible location for both products is Santa Marta, with satisfactory feasibility in terms of NPV (€ 4,428,442), TIR (44%), ROI (133%) and payback (3.8 years) for a 10%  $\beta$ -carotene concentration, and VPN (€ 5,529,203), TIR (50%), ROI (158%) and payback (1.9 years) for a 5% Astaxanthin concentration.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector Andrés Fernando Barajas Solano

## INTRODUCCIÓN

Las microalgas combinan de forma equilibrada algunas propiedades biológicas de las plantas superiores (fotosíntesis, y requisitos nutricionales simples) con atributos biotecnológicos propios de los microorganismos (tasas de crecimiento rápido y capacidad de acumular o segregar metabolitos primarios y secundarios). Además su capacidad de adaptación para sobrevivir bajo un amplio espectro de tensiones ambientales, incluyendo (pero no limitado a) el calor, el frío, la sequía, la salinidad, la fotooxidación, la anaerobiosis, la presión osmótica y la exposición a los rayos UV<sup>1</sup>. Esta combinación bastante útil ha llevado a la selección de tales microorganismos para procesos aplicados y se han asociado una serie de funciones biológicas muy importantes con sus propiedades antioxidantes, su papel en la biosíntesis de hormonas y su función como precursores directos de la vitamina A<sup>2</sup>, asimismo de ser utilizadas actualmente como fuente de proteína y lípidos para la producción acuícola, el valor nutricional de la biomasa de microalgas va mucho más allá e incluye la obtención de colorantes y ácidos grasos con altos beneficios para el consumo humano. Por consiguiente, los mercados alimentario, farmacéutico y cosmético se han beneficiado de una creciente gama de productos microalgales<sup>3</sup>.

Uno de los metabolitos importantes de las microalgas, que recientemente han recibido atención, son los carotenoides, los cuales son pigmentos orgánicos, lipofílicos, pertenecientes al grupo de los isoprenoides que naturalmente se producen a partir de organismos fotosintéticos, hongos y bacterias<sup>1,4,5</sup>. Se

---

<sup>1</sup> HERNÁNDEZ-PÉREZ, Alexi. LABBÉ, José I. "Microalgas, Cultivo Y Beneficios." *Revista De Biología Marina Y Oceanografía*, vol 49, no. 2, 2014, pp. 157-173. Scielo Comision Nacional De Investigacion Cientifica Y Tecnologica (CONICYT).

<sup>2</sup> PULZ, Otto. GROSS, Wolfgang. "Valuable Products From Biotechnology Of Microalgae." *Applied Microbiology And Biotechnology*, vol 65, no. 6, 2004, pp. 635-648. Springer Nature.

<sup>3</sup> SIEW MOI, Phang. "Handbook Of Microalgal Culture. Biotechnology And Applied Phycology." *Journal Of Applied Phycology*, vol 16, no. 2, 2004, pp. 159-160. Springer Nature.

<sup>4</sup> GONG, Mengyue. BASSI, Amarjeet "Carotenoids From Microalgae: A Review Of Recent Developments." *Biotechnology Advances*, vol 34, no. 8, 2016, pp. 1396-1412. Elsevier BV.

<sup>5</sup> JANG, Hae-Rim et al. "Production Of Biomass And Bioactive Compounds From Shoot Cultures Of *Rosa Rugosa* Using A Bioreactor Culture System." *Horticulture, Environment, And Biotechnology*, vol 57, no. 1, 2016, pp. 79-87. Springer Nature.

caracterizan por ser de color amarillo, naranja o rojo. La gran mayoría se reconocen porque se compone de una estructura de C40 de las unidades de isopreno denominadas terpenoides, y se dividen en dos grupos: xantofilas y carotenos<sup>4</sup>. Su funcionalidad en las plantas determina si son carotenoides primarios o secundarios. Un carotenoide primario es necesario en el proceso fotosintético (como lo son  $\beta$ - caroteno, luteína o neoxantina), mientras que un carotenoide secundario no está directamente involucrado en la supervivencia de la planta (como  $\alpha$ -caroteno, capsantina o licopeno). A partir de esta molécula básica y por distintos procedimientos enzimáticos se forman aproximadamente 600 carotenoides que existen en la naturaleza, que aparecen mayoritariamente en la forma isomérica trans, aunque, en algunos casos, también se presenta el isómero cis<sup>6</sup>.

Las microalgas más utilizadas para la producción de carotenoides son: *Scenedesmus almeriensis* productora de luteína  $\beta$ -caroteno<sup>7</sup>, *Coelastrella striolata* var. *Multistriata* produciendo, Canthaxantina, Astaxantina y  $\beta$ -caroteno<sup>8</sup>, *Chlorella vulgaris* elabora Canthaxantina y Astaxantina<sup>9</sup>. *Dunaliella salina* concentra  $\beta$ -caroteno<sup>10</sup> y *Haematococcus pluvialis* con alto contenido de astaxantina, Canthaxantina y luteína<sup>11</sup>. La microalga biflagelada verde halófila *D. salina* se ha reconocido por su capacidad para crecer en ambientes de alta salinidad y como una fuente biológica eficiente de  $\beta$ - caroteno, un pigmento con una amplia variedad de aplicaciones en el mercado como: colorantes

---

<sup>6</sup> MATTEA, Facundo et al. "Carotenoid Processing With Supercritical Fluids." Journal Of Food Engineering, vol 93, no. 3, 2009, pp. 255-265. Elsevier BV.

<sup>7</sup> MACÍAS-SÁNCHEZ, M.D. et al. "Supercritical Fluid Extraction Of Carotenoids From Scenedesmus Almeriensis." Food Chemistry, vol 123, no. 3, 2010, pp. 928-935. Elsevier BV.

<sup>8</sup> ABE, Katsuya et al. "Accumulation And Antioxidant Activity Of Secondary Carotenoids In The Aerial Microalga Coelastrella Striolata Var. Multistriata." Food Chemistry, vol 100, no. 2, 2007, pp. 656-661. Elsevier BV.

<sup>9</sup> ABD EL-BAKY, Hanaa H. EL-BAROTY, Gamal S. "WITHDRAWN: Enhancement Of Carotenoids In Dunaliella Salina For Use As Dietary Supplements And In The Preservation Foods." Food And Chemical Toxicology, 2010, Elsevier BV

<sup>10</sup> RABBANI, Said et al. "Induced B-Carotene Synthesis Driven By Triacylglycerol Deposition In The Unicellular Alga Dunaliella Bardawil." Plant Physiology, vol 116, no. 4, 1998, pp. 1239-1248. American Society Of Plant Biologists (ASPB).

<sup>11</sup> GUEDES, Ana Catarina et al. "Microalgae As Sources Of Carotenoids." Marine Drugs, vol 9, no. 12, 2011, pp. 625-644. MDPI AG.

alimenticios; pro-vitamina A (retinol) en alimentos y piensos; aditivo a los cosméticos, preparados multivitamínicos, y en la última década como un producto alimenticio saludable bajo la reivindicación antioxidante y prevención de enfermedades tales como: diferentes tipos de cáncer, enfermedades inflamatorias crónicas, síndrome metabólico, diabetes, nefropatía diabética; enfermedades cardiovasculares, gastrointestinales, hepáticas, neurodegenerativas, oculares, cutáneas, fatiga inducida por el ejercicio, infertilidad masculina e insuficiencia renal<sup>12,13</sup>. *D. Salina* es capaz de acumular una gran cantidad de  $\beta$ -caroteno cuando crece bajo condiciones de estrés selectivo incluyendo alta concentración de sal, alta intensidad de luz y hambruna de nitrógeno, contiene aproximadamente el 14% de  $\beta$ -caroteno en peso seco algal<sup>14</sup>, conformado por isómeros cis y trans, que tiene 10% de 15-cis- $\beta$ -caroteno, 41% de 9-cis- $\beta$ -caroteno, 42% de trans- $\beta$ -caroteno y 6% de otros isómeros y representa aproximadamente el 80% del total de carotenoides. Más del 90% del  $\beta$ -caroteno comercial y más precisamente el isómero todo-trans se sintetiza químicamente<sup>15,16</sup>, pero el 9-cis- $\beta$ -caroteno se produce sólo a partir de fuentes naturales como verduras y microalgas. Esta forma isómera tiene un valor metabólico más alto, ya que tiene una mejor capacidad antioxidante que el isómero todo trans, una liposolubilidad superior y se acumula más eficazmente en tejido animal<sup>17</sup>.

---

<sup>12</sup>EDGE, R. et al. "The Carotenoids As Anti-Oxidants — A Review." *Journal Of Photochemistry And Photobiology B: Biology*, vol 41, no. 3, 1997, pp. 189-200. Elsevier BV.

<sup>13</sup>JOHNSON, E.A. et al. *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*. Fiechter, vol. 53, 1995, pp. 119–17, Springer-Verlag, Berlin.

<sup>14</sup>GARCÍA-GONZÁLEZ, M. et al. "Conditions For Open-Air Outdoor Culture Of *Dunaliella Salina* In Southern Spain." *Journal Of Applied Phycology*, vol 15, no. 2/3, 2003, pp. 177-184. Springer Nature.

<sup>15</sup>LEÓN, R. "Microalgae Mediated Photoproduction Of  $\beta$ -Carotene In Aqueous–Organic Two Phase Systems." *Biomolecular Engineering*, vol 20, no. 4-6, 2003, pp. 177-182. Elsevier B.

<sup>16</sup>BEN-AMOTZ, A. et al. "Stereoisomers Of  $\beta$ -Carotene And Phytoene In The Alga *Dunaliella Bardawil*." *PLANT PHYSIOLOGY*, vol 86, no. 4, 1988, pp. 1286-1291. American Society Of Plant Biologists (ASPB).

<sup>17</sup>GOMEZ, P. I. et al. "From Genetic Improvement To Commercial-Scale Mass Culture Of A Chilean Strain Of The Green Microalga *Haematococcus Pluvialis* With Enhanced Productivity Of The Red Ketocarotenoid Astaxanthin." *Aob Plants*, vol 5, no. 0, 2013, pp. plt026-plt026. Oxford University Press (OUP).

A su vez *Haematococcus pluvialis*, alga verde de agua dulce, unicelular, biflagelada con sus células encapsuladas por una pared ovoide, elipsoide o cilíndrica es de gran importancia comercial, ya que bajo ciertos tipos de estrés como son la temperatura, intensidad lumínica, ciclos de luz/oscuridad, concentración de nutrientes, pH, especies reactivas de oxígeno, sales y presencia de inhibidores de procesos metabólicos a diferente nivel, hacen que sea capaz de sintetizar y acumular gran cantidad de Astaxantina, que llega a constituir entre 2-5% del peso seco de la microalga conteniendo 36,7 mg/g de trans-Astaxantina (73,1 %) y 13,5 mg/g de cis-Astaxantina (26,9 %); en forma de mono ésteres (80 %) y di ésteres (15 %) y (5 %) libre<sup>18,19,20</sup>, esto se logra con un ciclo con diferentes formas celulares respondiendo a los estímulos del medio, en el tiempo se caracteriza por mostrar 3 morfologías: vegetativa (verde con presencia de flagelos), palmella (verde, esférica sin flagelos) y aplanóspora (roja, esférica sin flagelos) es en esta última donde se produce la Astaxantina como respuesta al medio<sup>21</sup>. Lo anterior convierte a *H. pluvialis* en la mayor fuente natural de este bioproducto, por sobre otras fuentes convencionales como son la levadura *Phaffia rhodozyma* y restos de crustáceos<sup>22</sup>. La Astaxantina ha llamado la atención como un suplemento nutricional, siendo inhibidor de la peroxidación de lípidos, reductor de la inflamación gástrica, potencial neuroprotector e inmunomodulador<sup>23</sup> y sirve como alimento nutracéutico por su alto poder antioxidante<sup>24</sup>. Ha demostrado tener efectos positivos en la salud tales como prevención de procesos inflamatorios, mejoramiento de la respuesta inmune y reducción del nivel de triglicéridos en la

---

<sup>18</sup> CORDOBA ASTROC, Nancy et al. "Obtención Y Caracterización De Astaxantina De La Microalga *Haematococcus Pluvialis*." *Ugciencia*, vol 21, 2016, p. 73. Universidad La Gran Colombia.

<sup>19</sup> MENDES, Rui L. et al. "Supercritical Carbon Dioxide Extraction Of Compounds With Pharmaceutical Importance From Microalgae." *Inorganica Chimica Acta*, vol 356, 2003, pp. 328-334. Elsevier BV.

<sup>20</sup> ROLDÁN, P. L. "Efecto del Consumo de Astaxantina en la Salud". Recuperado el Mayo de 2015, de Universitat Oberta de Catalunya. (2012).

<sup>21</sup> DOMÍNGUEZ A, F. "Astaxantina, el oro rojo de la microalga *Haematococcus pluvialis*". *Algas. Boletín Nacional de Ficología*, 4-8. (2006).

<sup>22</sup> HIGUERA-CIAPARA, I. et al. "Astaxanthin: A Review of its Chemistry and Applications". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(2), pp.185-196. (2006).

<sup>23</sup> CHITTCHANG, Uraiporn et al. "Recommending Vitamin A—Rich Foods In Southern Thailand." *Food And Nutrition Bulletin*, vol 20, no. 2, 1999, pp. 238-242. SAGE Publications.

<sup>24</sup> HSU, Yu-Wen et al. "Protective Effects Of *Dunaliella Salina* – A Carotenoids-Rich Alga, Against Carbon Tetrachloride-Induced Hepatotoxicity In Mice." *Food And Chemical Toxicology*, vol 46, no. 10, 2008, pp. 3311-3317. Elsevier BV.

sangre<sup>25</sup>, como un agente de protección contra las enfermedades asociadas a los radicales libres, incluyendo cánceres orales, de colon y del hígado, enfermedades cardiovasculares como la aterosclerosis y enfermedades oculares degenerativas tales como la catarata<sup>26</sup>. Además, la Astaxantina se utiliza como agente colorante en la acuicultura para impartir pigmentación roja en cuerpos de animales.

Actualmente el mercado del  $\beta$ -caroteno es aproximadamente 1 200 toneladas al año que representó 261 millones de dólares en 2010, la cual el 20-30% del mercado pertenece al carotenoide en su forma natural. Se espera que el mercado sea de 334 millones de dólares en 2018, con una tasa de crecimiento anual compuesto del 2,3%<sup>13</sup>. El precio del  $\beta$ -caroteno oscila entre USD 300/kg a USD 3 000/kg, dependiendo del tipo de producto <sup>14,15</sup>. Por otra parte la Astaxantina natural, tiene un mercado de 300 toneladas anuales con un costo aproximado de 1.2 millones de dólares y la producida sintéticamente a partir de fuentes petroquímicas constituye alrededor de más de 200 millones anuales y un precio de venta de alrededor de USD 2 000/kg de Astaxantina pura. La Astaxantina natural se vende por más de USD 7 000/kg [16, 17,18]. Este mercado está dominado por 24 empresas localizadas en 13 países (**Alemania**: Cognis.; **Australia**: Western Biotechnology, Ltd.; Betatene, Ltd.; AquaCarotene.; **Chile**: Atacama Bio Natural.; **China**: Jingzhou Natural Astaxanthin Inc, Kunming Biogenic Co. Ltd, Beijing Ginko Group (BGG) Biologica, Wefirst Biotechnology Co. Ltd. Inner Mongolia Biological Eng, Tianjin Lantai Biotechnology.; **Estados Unidos**: Cyanotech Corporation, Mera Pharmaceutigals Inc, Valensa International y Algatechnologies Ltd.; **Francia**: AlgoSource Technologies.; **India**: Parry Nutraceuticals Ltd.; **Israel**: Nature Beta Technologies (NBT); **Japón**: Fuji Chemical Industry co Ltd.; **Malasia**: Algaetech

---

<sup>25</sup> GUERIN, Martin et al. "Haematococcus Astaxanthin: Applications For Human Health And Nutrition." Trends In Biotechnology, vol 21, no. 5, 2003, pp. 210-216. Elsevier BV.

<sup>26</sup> LORENZ, R.Todd, et al. "Commercial Potential For Haematococcus Microalgae As A Natural Source Of Astaxanthin." Trends In Biotechnology, vol 18, no. 4, 2000, pp. 160-167. Elsevier BV.

International.; **Nueva Zelanda:** Supreme Biotechnologies NZ Ltd.; **Reino Unido:** Britannia Health Products Ltd.; y **Suecia:** Bioreal AB)<sup>27,28</sup>.

Hasta ahora no existen plantas (ni empresas) colombianas enfocadas a la producción de microalgas y el aprovechamiento de sus metabolitos, por lo cual el Desarrollo e Innovación en este campo es importante para el fortalecimiento de la capacidad productiva del país en áreas como la acuicultura, farmacéutica, y nutracéutica. En sus últimos 5 años se ha importado alrededor de 92 toneladas de  $\beta$ -caroteno y 150 toneladas de Astaxantina por año desde Estados Unidos, Francia, Guatemala, Honduras, México, y Panamá.

Teniendo en cuenta todo lo anterior el presente proyecto basa su investigación en un estudio de pre-factibilidad técnico-económica de un sistema híbrido para el cultivo, producción y extracción de  $\beta$ -caroteno y astaxantina a gran escala en su forma natural a partir de *D. salina* y *H. pluvialis* respectivamente.

---

<sup>27</sup> SHAH, Md.et al. "Astaxanthin-Producing Green Microalga Haematococcus Pluvialis: From Single Cell To High Value Commercial Products." *Frontiers In Plant Science*, vol 7, 2016, Frontiers Media SA.

<sup>28</sup> DEL CAMPO, José A. et al. "Outdoor Cultivation Of Microalgae For Carotenoid Production: Current State And Perspectives." *Applied Microbiology And Biotechnology*, vol 74, no. 6, 2007, pp. 1163-1174. Springer Nature.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio técnico-económico de la implementación de un sistema de producción de colorantes y antioxidantes a partir de microalgas en Colombia.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Analizar la oferta y la demanda en el mercado nacional de producción de  $\beta$ -caroteno y astaxantina.

Determinar los parámetros técnicos que permitan el desarrollo del sistema de producción de carotenoides

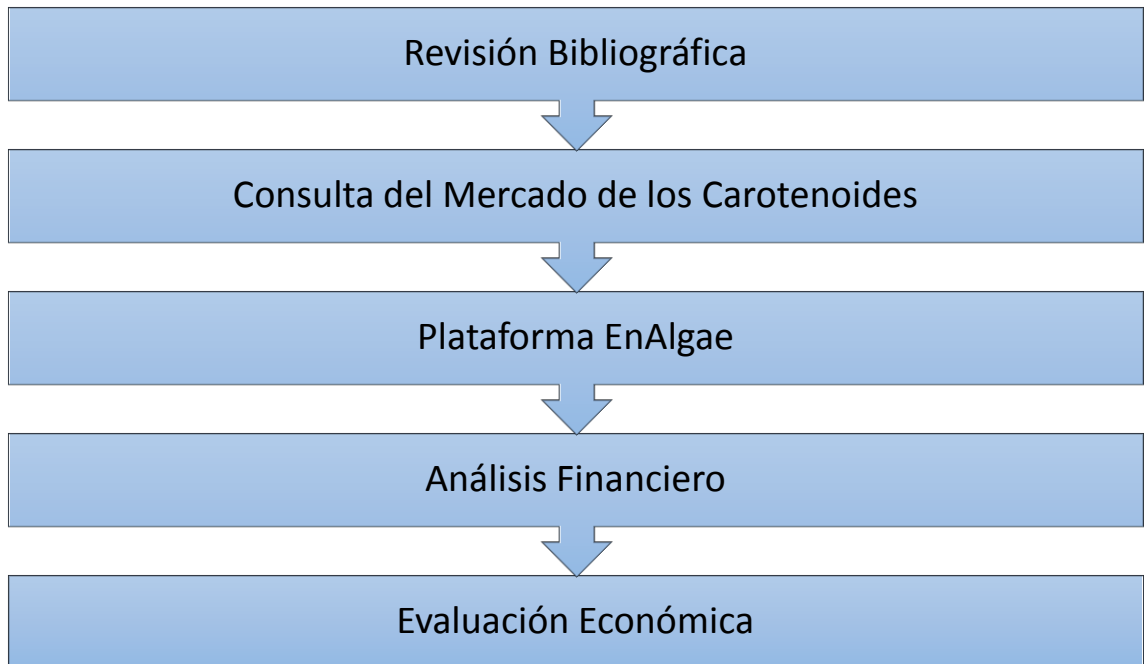
Elaborar un estudio financiero que evalúe la rentabilidad de la implementación de un sistema de producción de carotenoides a partir de microalgas.

Proponer el mejor sistema de producción para la obtención de  $\beta$ -caroteno y astaxantina.

## 2. METODOLOGÍA

En la figura 1 se presenta el esquema de la metodología que se realizó en este proyecto de investigación.

**Figura 1. Diagrama de Flujo Metodología**



### 2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se revisó la base de revistas especializadas, tesis de pregrado y posgrado de la Universidad Industrial de Santander con especial énfasis en: *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, cultivo y cosecha de microalgas, extracción supercrítica con CO<sub>2</sub>, funcionamiento de sistemas de producción de biomasa algal, β-caroteno y astaxantina.

### 2.2. EVALUACIÓN DEL MERCADO DE CAROTENOIDES

Para determinar el tamaño del mercado nacional de carotenoides (β-caroteno y astaxantina) se examinaron las bases de datos pertenecientes al DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), Banco de Datos de

Comercio Exterior BACEX (Servicio de procesamiento de información de importaciones y exportaciones del Ministerio de Industria y Turismo, el acceso a la base de datos fue proporcionado por la Universidad de Santander UDES) y la plataforma B2B QuimiNet.

### 2.3. PLATAFORMA EnAlgae

2.3.1. Condiciones de operación del Simulador El modelo principal hace referencia a datos de irradiación solar, temperatura, precipitación y evaporación consultados en el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y NASA (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio) en un periodo de 20 años para cinco ciudades colombianas: Barrancabermeja, Santander (7° 04'03"N, 73 ° 50'50" O) , Barranquilla, Atlántico ( 10° 57' 50"N, 74° 47'47" O) , Cartagena, Bolívar (10° 25'25"N, 75° 31'31" O ) , Cúcuta, Norte de Santander (7° 54'27"N, 72 ° 30'17" O) y Santa Marta, Magdalena (11° 14'10"N, 74° 12'06" O).

2.3.2. Escenarios Se desarrollaron 2 escenarios configurados de la siguiente manera:

- Sistema de cultivo empleando Radiación Solar (escenario 1).
- Sistema de cultivo asistido por luz artificial LED (escenario 2).

En el caso de *D. salina* se evaluaron dos medios de cultivo: (1.a) medio sintético y (1.b) agua de mar enriquecida.

2.3.3. Modificación del Software Se emplearon los 3 software desarrollados por EnAlgae (Open Pond, Flat Panel y tubular PBR) disponibles en la página web: [www.enalgae.eu](http://www.enalgae.eu)<sup>29</sup>, estos solo permiten calcular los costos de producción y concentración de biomasa.

---

<sup>29</sup> WATERS. "About Algae | Enalgae." Enalgae.Eu, 2017, <http://www.enalgae.eu/about-algae.htm>.

Para la producción y extracción de carotenoides se creó un sistema híbrido configurado de la siguiente manera: flat panel+ open pond y PBR tubular + open pond. A estos se le implementaron 4 fases: Filtración, Deshidratación, Disrupción celular y Extracción Supercrítica.

## **2.4. ANÁLISIS FINANCIERO**

Para el análisis financiero se consideraron los costos a lo largo de la cadena de producción en lo que respecta a gastos de capital (FCI) y gastos operativos (COM). El FCI incluye costos de equipos y costos de capital fijo, la primera parte tomado del proyecto de Enalgae (cultivo y cosecha) y las implementaciones de las demás etapas se cotizaron a empresas relacionadas con esta industria, se planteó una vida útil de 10 años. COM se refiere a todos los costos para que la línea de producción funcione, como materia prima ( $C_{RM}$ ), costo de mano de obra ( $C_{OL}$ ), costos de servicios industriales ( $C_{UT}$ ) y costo de manejo de desechos ( $C_{WT}$ ) que fueron consultados en las diferentes empresas prestadoras de servicios públicos y privados. Las cantidades se derivaron del análisis de los flujos de masa y energía asociados a las diferentes etapas. Los beneficios fueron determinados por los precios en el mercado de carotenoides y biomasa residual.

## **2.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA**

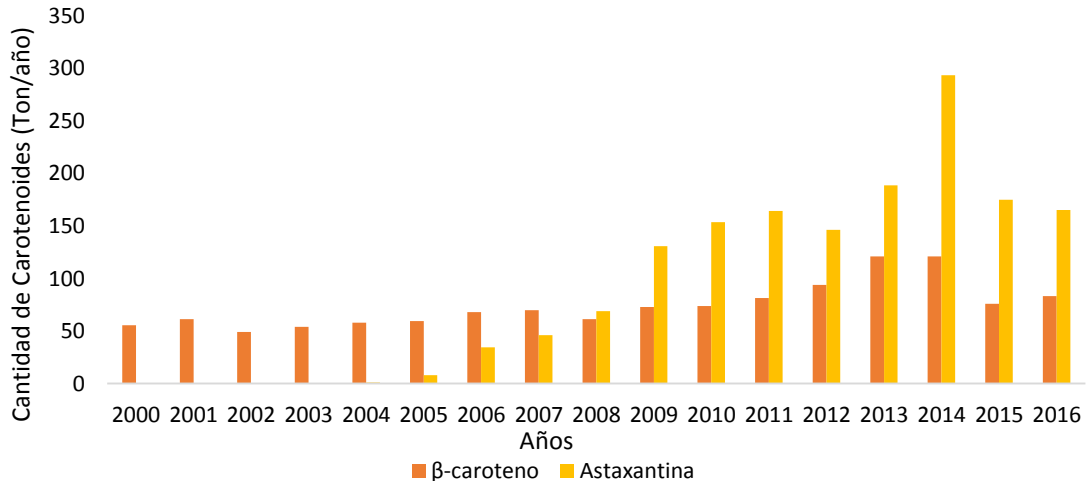
Para el escenario seleccionado, se creó un flujo de caja teniendo en cuenta: costo de terreno, inversión de capital, capital de trabajo, costos de operación, valor de salvamento, interés de oportunidad, depreciación, años de inversión del capital, vida útil y depreciación de la planta; para evaluar los indicadores de factibilidad, VPN, TIR Y PB. A partir de estos, se decidió la ciudad para el funcionamiento de la planta, teniendo en cuenta que el criterio de decisión se basa en un VPN alto y positivo, TIR mayor al interés de oportunidad Y PB menor a la vida útil del proyecto.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. MERCADO DE CAROTENOIDES

De acuerdo con los datos obtenidos de las bases de datos se pudo determinar que (Gráfica 1) en los últimos 5 años se han importado alrededor de 96 ton  $\beta$ -caroteno/año y 188 ton astaxantina/año. De igual forma no se encontró datos relacionados con la producción de estos colorantes en Colombia y su venta (ya sea interna o exportación). Por todo lo anterior, En Colombia según el mercado resulta razonable la implementación de una planta productora de colorantes y antioxidantes a partir de microalgas.

**Gráfica 1. Importaciones de  $\beta$ -caroteno y astaxantina en los últimos 16 años**

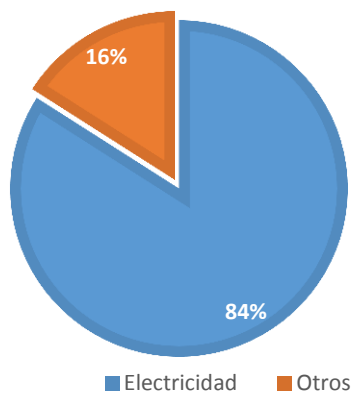


#### 3.2. PLATAFORMA EnAlgae

3.2.1. Condiciones de operación del simulador Los datos consultados en el IDEAM y la NASA para las variables de radiación, temperatura, evaporación y precipitación se presentan en el **ANEXO A**.

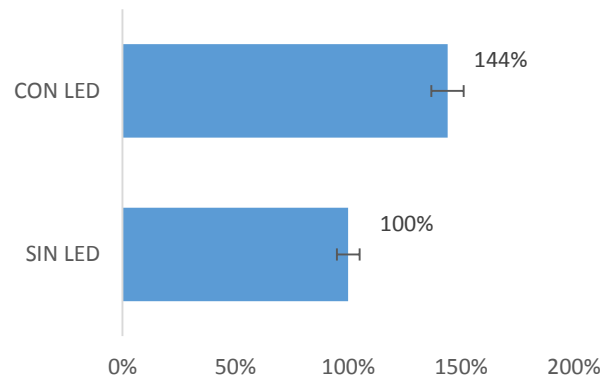
3.2.2. Escenarios De acuerdo con los resultados obtenidos por el simulador EnAlgae para los 2 escenarios se encontró que el escenario 1 sin luz artificial tiene una inversión inicial de € 1.814.580 y el escenario 2 con luces LED tiene una inversión de € 1.953.580, sin embargo la principal diferencia entre ellos se ve en el costo operativo.

Gráfica 2. Costos operativos anuales sin Luz LED



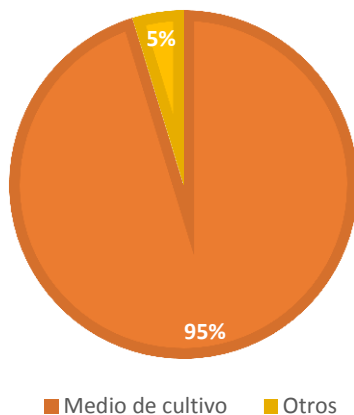
Operativos

Gráfica 3. Variación en los Costos

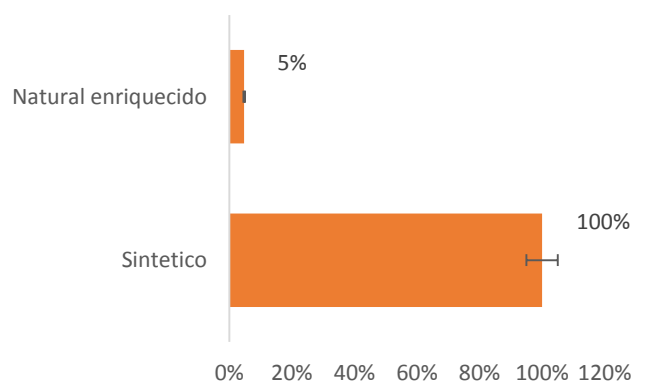


Acorde con la gráfica 2, se encuentra que el costo operativo de la electricidad representa el 84% del costo total el cual equivale a € 292.583/anual, al aplicar luces LED este se incrementa en un 44% equivalente a € 378.506. El escenario 2 se descartó ya que implicaba un gasto desproporcionado para una producción similar al sistema alimentado con iluminación solar.

Gráfica 4. Porcentaje del medio de Cultivo



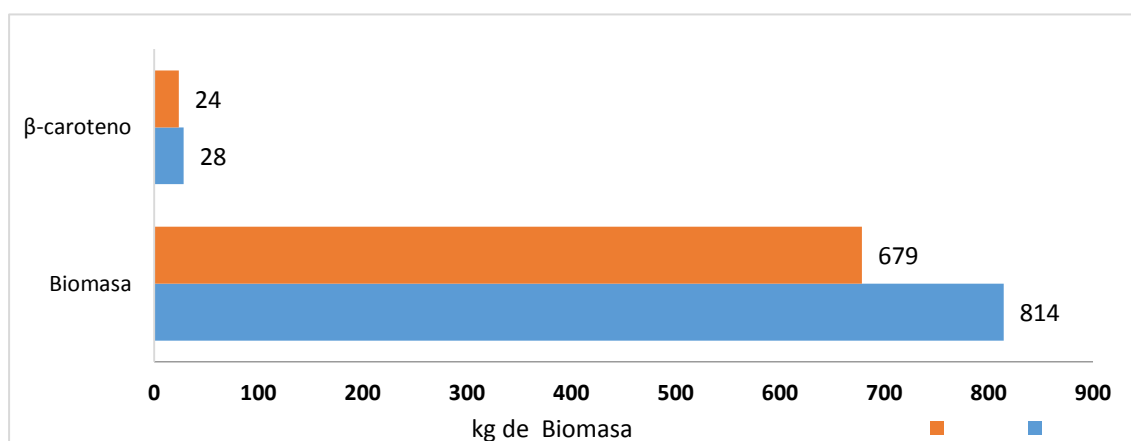
Gráfica 5. Variación en costo del medio



Analizando la gráfica 4, el medio sintético *Johnson J/1* (**ANEXO B**) representa un 96% del costo total operativo reportando un valor de € 6.063.324 (21 404 255.256 COP); sin embargo de acuerdo con *Borowitzka et al, (2013)*<sup>30</sup>, *D. salina* puede ser cultivada en agua marina enriquecida, sustituyendo el medio sintético por este, se observa que el costo del medio disminuye en un 95%( gráfica 5) minimizando el gasto a un total de € 303.167. Por esta razón las ciudades localizadas en el interior del país (Barrancabermeja y Cúcuta) se excluyeron del estudio.

De acuerdo con los datos obtenidos por parte del simulador se pudo evidenciar la diferencia en la producción de biomasa y extracción de carotenoides (gráfica 6,7) bajo las mismas condiciones en los 2 tipos de reactor; Según *Norsker et al, (2011)*<sup>31</sup> y *Christenson y Sims, (2011)*<sup>32</sup> la densidad celular y productividad en PBR tipo flat panel es 2,1 g/L y 0,041 kg/Ha y para los tubulares es 1,7 g/L y 0,064 kg/Ha respectivamente.

**Gráfica 6. Producción promedio mensual de biomasa y  $\beta$ -caroteno a partir de *D. salina* en PBR flat panel y tubular**



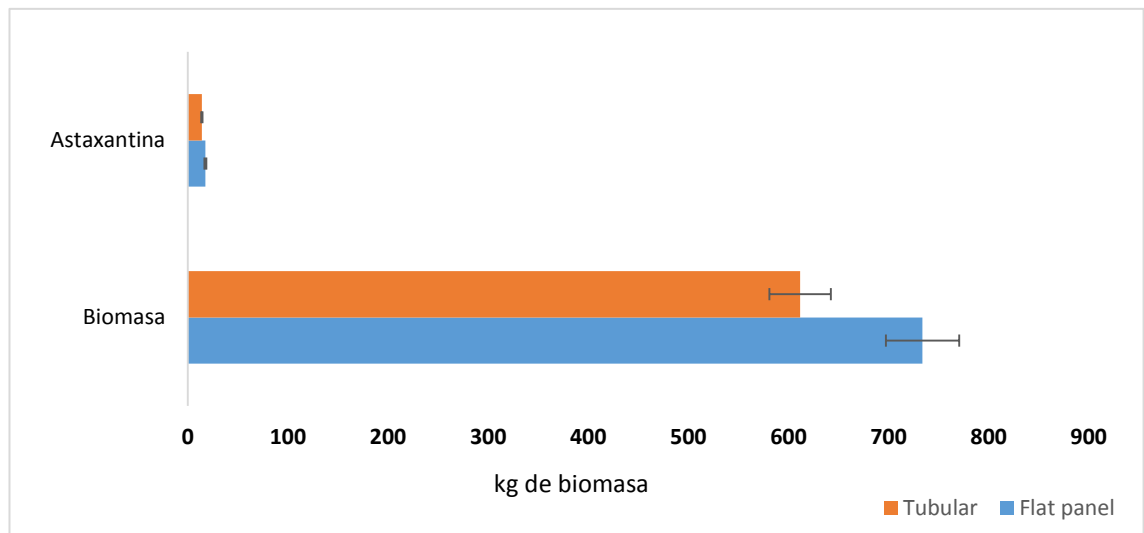
<sup>30</sup> BOROWITZKA M. Dunaliella: Biology, Production, and Markets. In: Richmond A, Hu Q (eds) Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology, Second Edition. Blackwell, pp 359-368. (2013).

<sup>31</sup> NORSKER, Niels-Henrik et al. "Microalgal Production — A Close Look At The Economics." Biotechnology Advances, vol 29, no. 1, 2011, pp. 24-27. Elsevier BV.

<sup>32</sup> CHRISTENSON, Logan. SIMS, Ronal. "Production And Harvesting Of Microalgae For Wastewater Treatment, Biofuels, And Bioproducts." Biotechnology Advances, vol 29, no. 6, 2011, pp. 686-702. Elsevier BV.

De acuerdo con la gráfica 6, Un sistema híbrido tubular produce en promedio 678 kg biomasa/mes con un total de 7.298 kg biomasa/año, en cambio un flat panel tiene un promedio de 814 kg biomasa/mes con un total anual de 8.758 kg de biomasa.

**Gráfica 7. Producción promedio mensual de biomasa y astaxantina a partir de *H. pluvialis* en PBR flat panel y tubular**



Con la gráfica 7, se percibe que con un sistema híbrido tubular es posible extraer 12 kg astaxantina /mes y con flat panel 17 kg astaxantina/ mes, con un total de 167 Kg astaxantina/año y 210 kg astaxantina/año respectivamente. Se comprueba así que el sistema híbrido del escenario 1 compuesto por reactores tubulares tienen una menor productividad de biomasa y por ende de carotenoides. Por esta razón, se descartan los sistemas tubulares para el diseño de la planta de producción.

3.2.3. Modificación del Software El modelo usado para la producción de biomasa y los parámetros necesarios para el crecimiento de la microalga se detallaron en el **ANEXO C** y **ANEXO D** respectivamente.

Para la filtración se consultó la empresa NP INGENIERIA DE AGUAS para adquirir un sistema de tratamiento de agua para sistemas de recirculación. Las especificaciones de este equipo se presentan en el **ANEXO E**. Para dar uniformidad al polvo y estabilidad al carotenoide se implementó una etapa de deshidratación escogiendo un sistema de secado por pulverización por ser el método más común y estudiado a escala industrial. Las especificaciones técnicas se obtuvieron de la literatura<sup>33</sup>.

En el caso de *H. pluvialis* se adicionó la disrupción celular, la selección del equipo dependió de la pared celular y de la naturaleza del producto a obtener, teniendo como resultado un molino de bolas que se consultó en el distribuidor comercial ALIBABA<sup>34</sup>. Para la recuperación del pigmento y/o antioxidante de interés se implementó un sistema de extracción con fluido supercrítico consultado en la empresa APEKS SUPERCRITICAL (<http://www.apekssupercritical.com/>), se tiene en cuenta la cantidad de biomasa y las variables de operación del CO<sub>2</sub>. Las especificaciones técnicas se presentan en el **ANEXO F**. El respectivo diagrama de flujo con las modificaciones e implementaciones se muestra en la figura 2 y 3 para β-caroteno y astaxantina respectivamente.

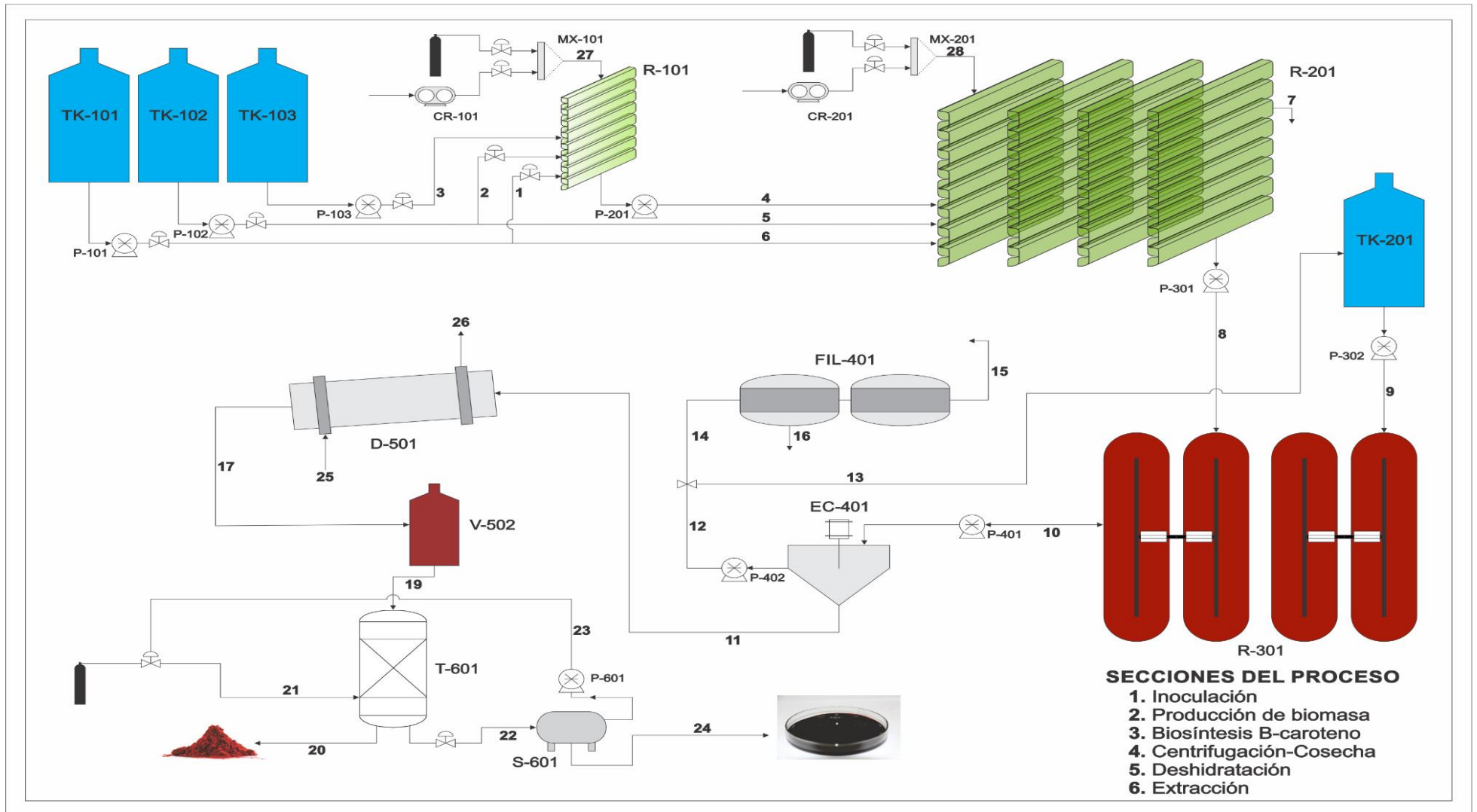
La descripción del proceso se encuentra en el **ANEXO G**. los balances de masa y energía para cada sistema se presentan a continuación.

---

<sup>33</sup> LI, Jian et al. "An Economic Assessment Of Astaxanthin Production By Large Scale Cultivation Of Haematococcus Pluvialis." Biotechnology Advances, vol 29, no. 6, 2011, pp. 568-574. Elsevier BV.

<sup>34</sup> WSC HORIZONTAL BEAD MILL/Sand Mill For Paint And Ink - Buy Sand Mill,Horizontal Sand Mill,Grinding Mill For Paint And Ink Product On Alibaba.Com." Wwww.Alibaba.Com, 2017, [http://www.alibaba.com/product-detail/WSC-horizontal-bead-mill-sand-mill\\_60107452537.html?s=p](http://www.alibaba.com/product-detail/WSC-horizontal-bead-mill-sand-mill_60107452537.html?s=p)

Figura 2. Diagrama de Flujo para la producción y extracción de  $\beta$ -caroteno

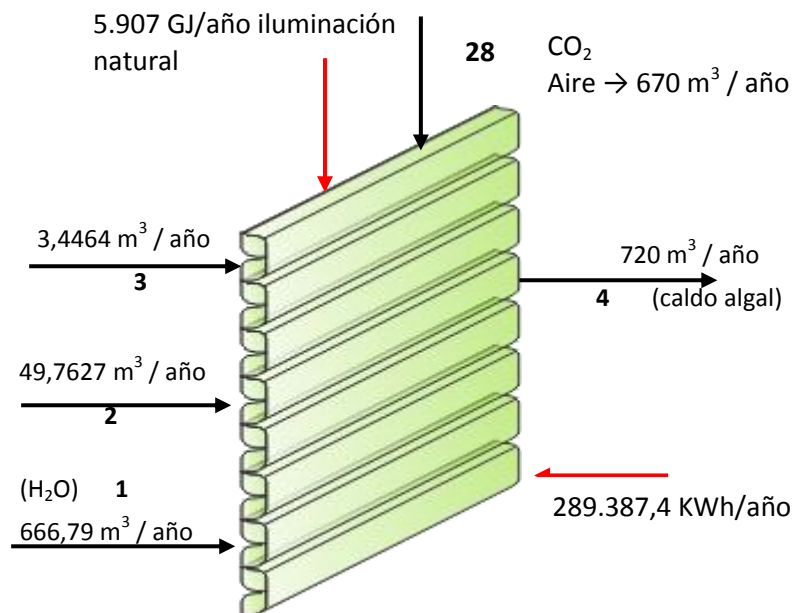


## PRODUCCIÓN DE $\beta$ -CAROTENO

### INÓCULO.

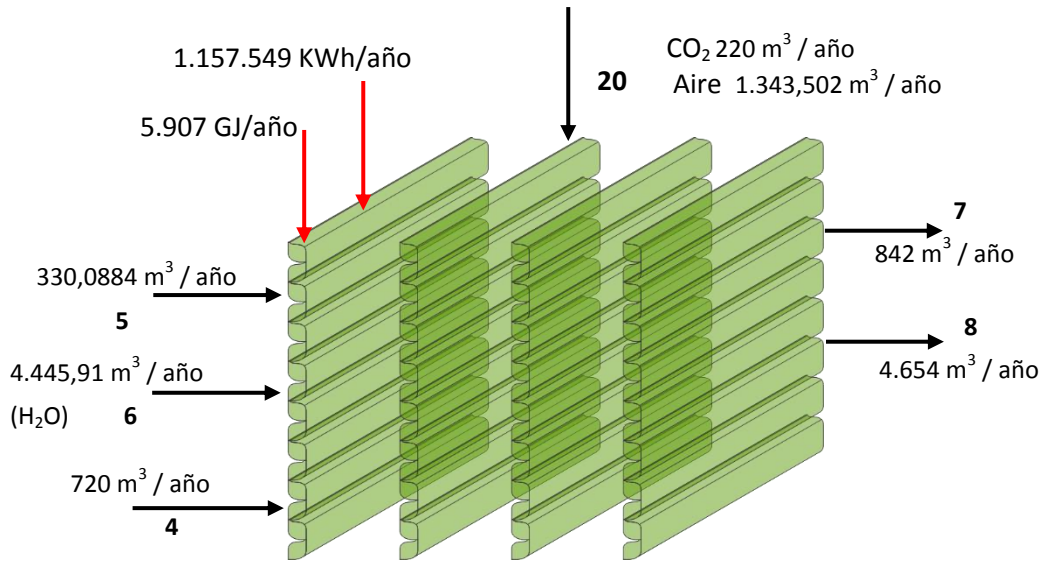
Balance de masa.

Inóculo	2	3	4	28
	kg/año	kg/año	kg/año	kg/año
$KH_2PO_4$	24.480			
$NaCl$	84 153,6			
$KNO_3$	720			
$H_3BO_3$		446,4		
$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$		266,4		
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$		39,2		
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$		34,2		
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$		28,8		
$Na_2EDTA \cdot 2H_2O$		1.339,2		
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$		1.519,2		
$MgCl_2$		504		
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$		360		
$KCl$		144		
$CaCl_2$		129,6		
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$		61,2		
$CO_2$				187
				639,2
<i>Biomasa</i>			1.512	



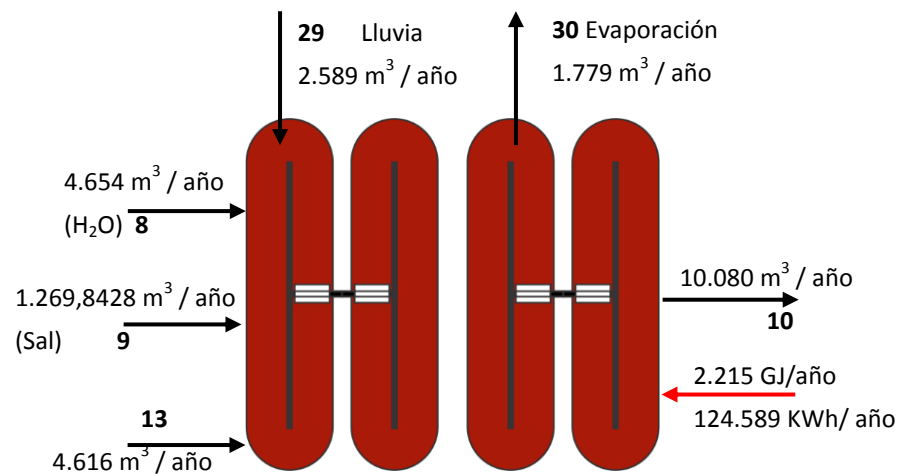
### CULTIVO "FASE VERDE"

fase verde	4	5	7	8
	kg/año	kg/año	kg/año	kg/año
$KH_2PO_4$		162.384	1,76	7,03
$NaCl$		558.218,8		
$KNO_3$		4.776	15,89	67,32
<b>Biomasa</b>	<b>1.512</b>			



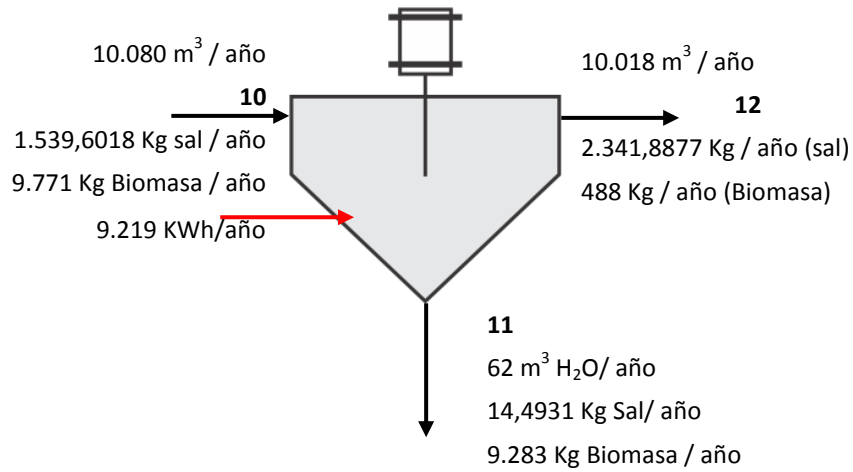
### CULTIVO ESTRÉS "FASE ROJA"

Fase roja	8	7	13	10	9
	kg/año	Kg/año	Kg/año	Kg/año	Kg/año
$KH_2PO_4$	7,03				
$KNO_3$	67,32				
$NaCl$			1.079,04	2.356,31	1.277,27
<b>Biomasa</b>	<b>9.771</b>			<b>9.771</b>	



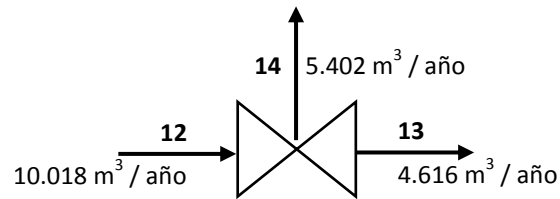
## CENTRÍFUGA

centrifuga	10	12	11
	kg/año	kg/año	kg/año
<i>Biomasa</i>	9.771	488	9.283
<i>NaCl</i>	2.356,31	2.341,81	14,49

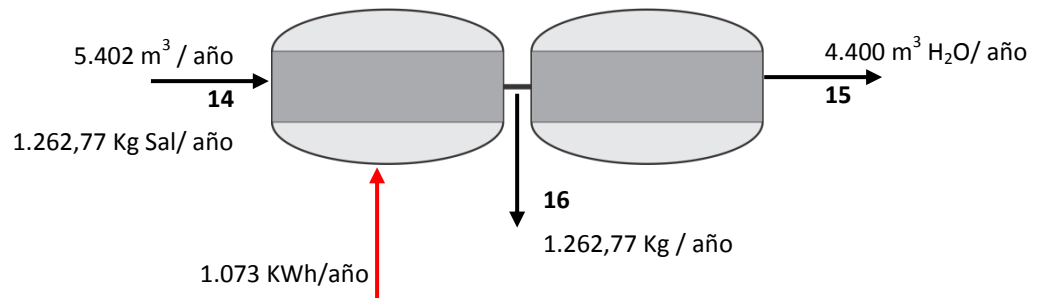


## FILTRO

### VÁLVULA ANTES DE FILTRO

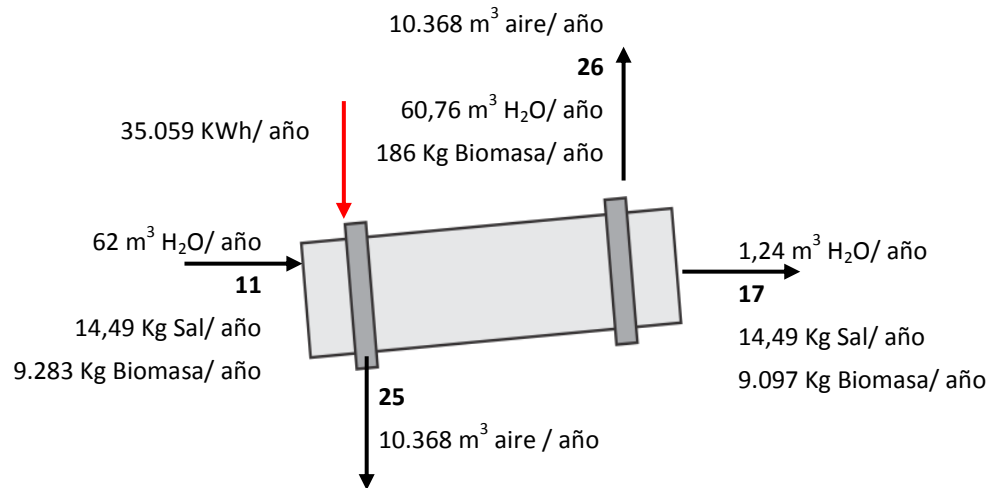


Filtro	14	15	16
	kg/año	kg/año	kg/año
<i>NaCl</i>	1.262.77		1 262.77



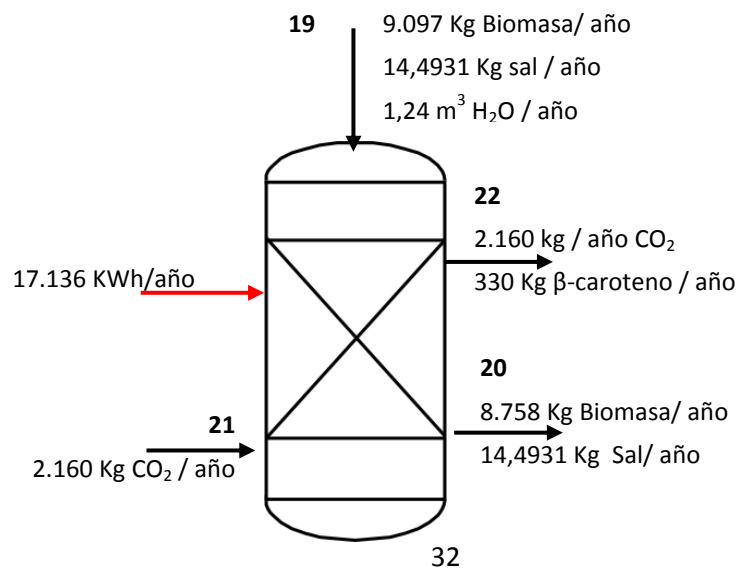
## SECADOR

Secador	11	17	25	26
	kg/año	kg/año	kg/año	kg/año
<i>Biomasa</i>	9.283	9.097		186
<i>NaCl</i>	14,49	14,49		



## EXTRACCIÓN SUPERCRÍTICA.

Extracción	21	22	20	19
	kg/año	kg/año	kg/año	kg/año
<i>Biomasa</i>			8.758	9.097
<i>NaCl</i>			14,49	14,49
<i>CO<sub>2</sub></i>	2.160	2.160		
<i>β-caroteno</i>		339		



## SEPARADOR LÍQUIDO-GAS

Separador	22	23	24
	Kg/año	Kg/año	Kg/año
<i>CO2</i>	2.160	2.160	
<i>β-caroteno</i>	339		339

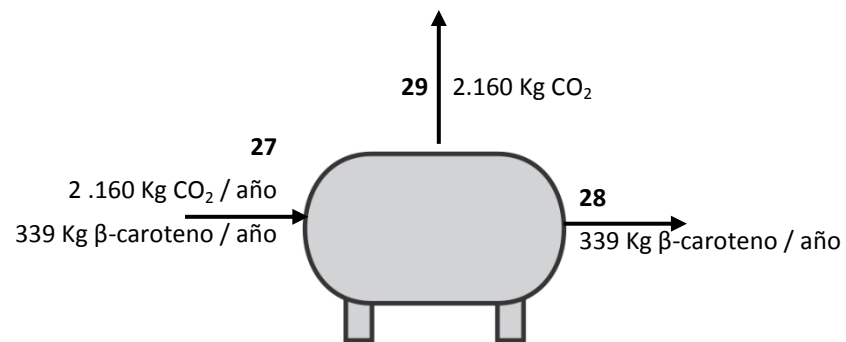
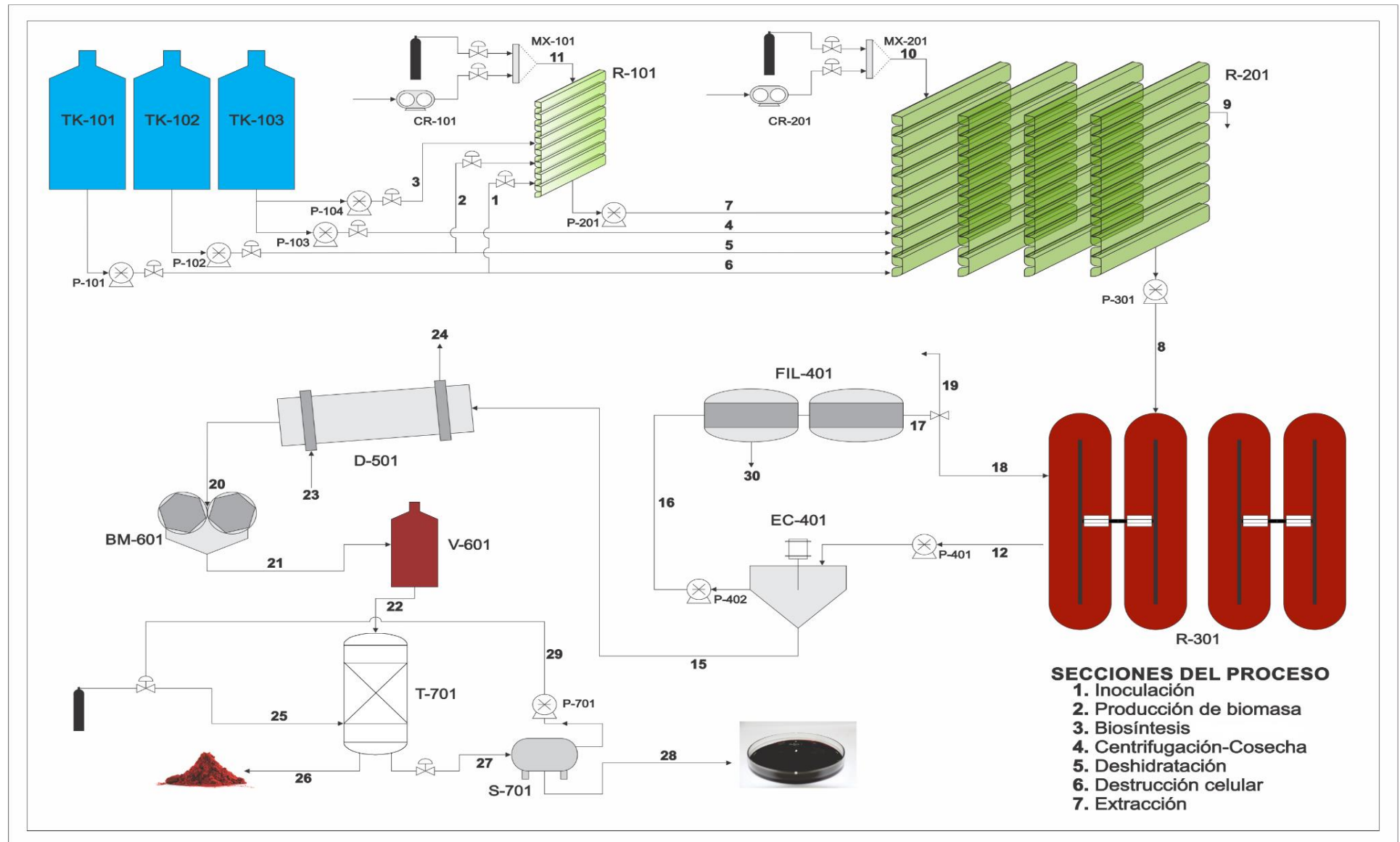


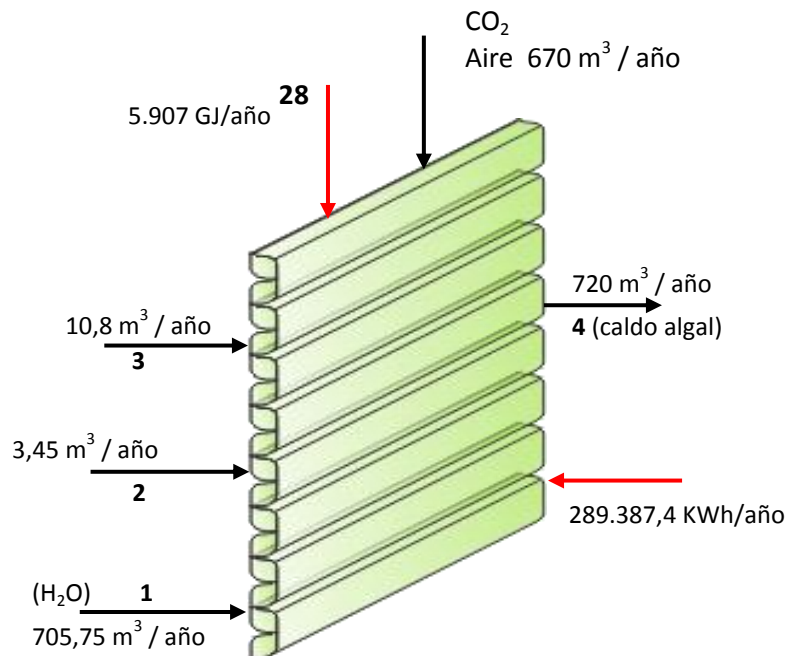
Figura 3. Diagrama de flujo para la producción y extracción de astaxantina



## PRODUCCIÓN DE ASTAXANTINA

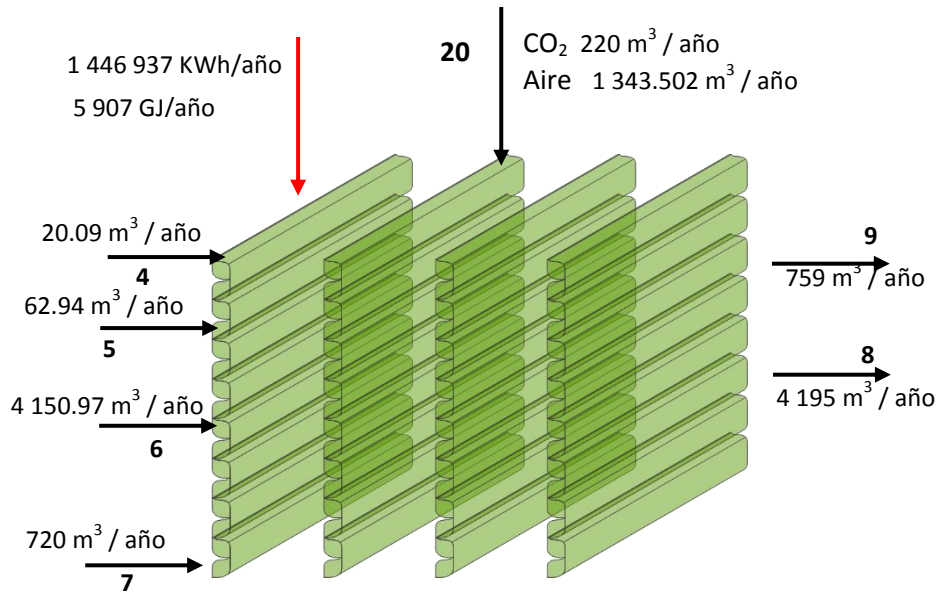
### INÓCULO

Inóculo	2	3	7	11
	kg/año	kg/año	kg/año	kg/año
$KH_2PO_4$	24.480			
$KNO_3$	720			
$H_3BO_3$		446,4		
$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$		266,4		
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$		39,2		
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$		34,2		
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$		28,8		
$Na_2EDTA \cdot 2H_2O$		1.339,2		
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$		1.519,2		
$MgCl_2$		504		
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$		360		
$KCl$		144		
$CaCl_2$		129,6		
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$		61,2		
$CO_2$				187.639,2



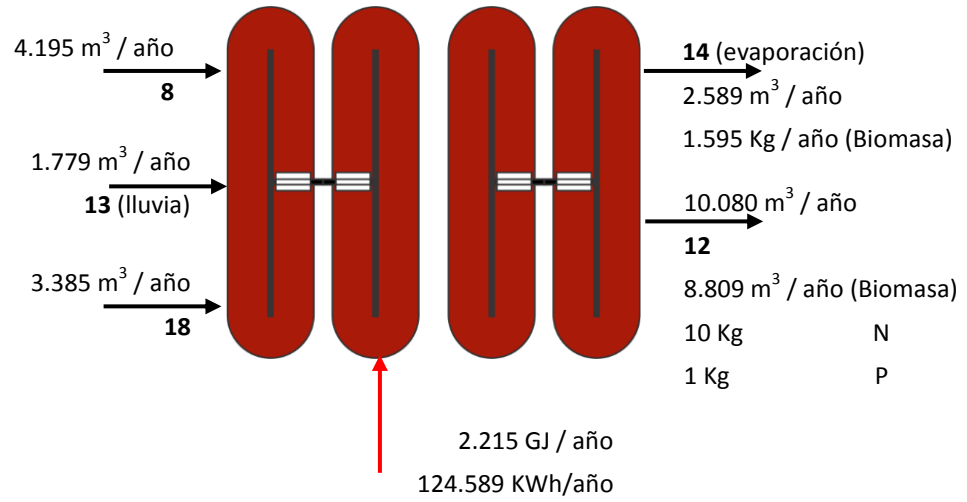
### CULTIVO “FASE VERDE”

Fase verde	5 kg/año	4 kg/año	7 kg/año
$KH_2PO_4$	14.263		
$KNO_3$	4.195		
$H_3BO_3$		2.600,9	
$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$		1.552,15	
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$		230,73	
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$		199,26	
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$		356,58	
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$		167,8	
$Na_2EDTA \cdot 2H_2O$		7.802,7	
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$		8.851,45	
$MgCl_2$		2.936,5	
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$		2.097,5	
$KCl$		839	
$CaCl_2$		755,1	
<b>Biomasa</b>			<b>10.405</b>



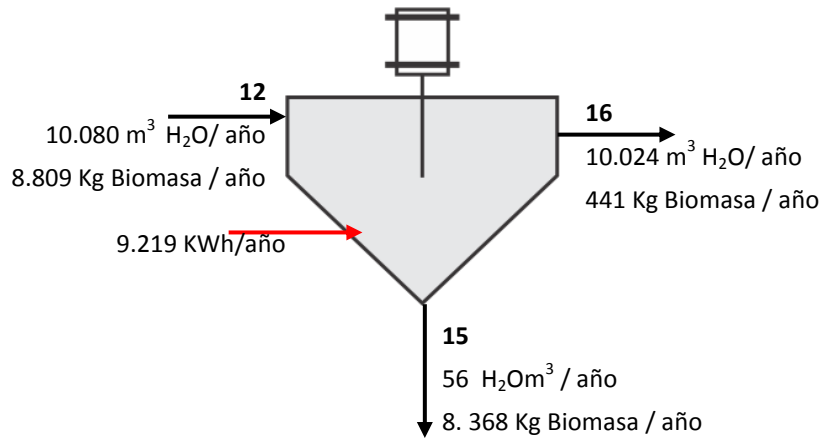
### CULTIVO ESTRÉS “FASE ROJA”

Etapa roja	14 kg/año	12 kg/año
$KH_2PO_4$		1
$KNO_3$		10
<b>Biomasa</b>	<b>1.596</b>	<b>8.809</b>

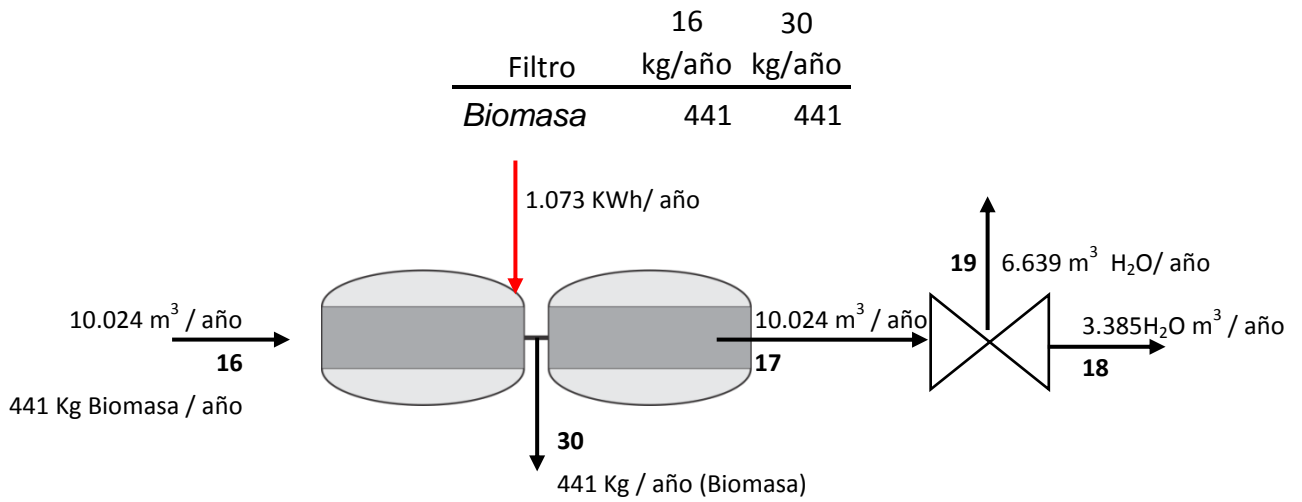


### CENTRIFUGACIÓN

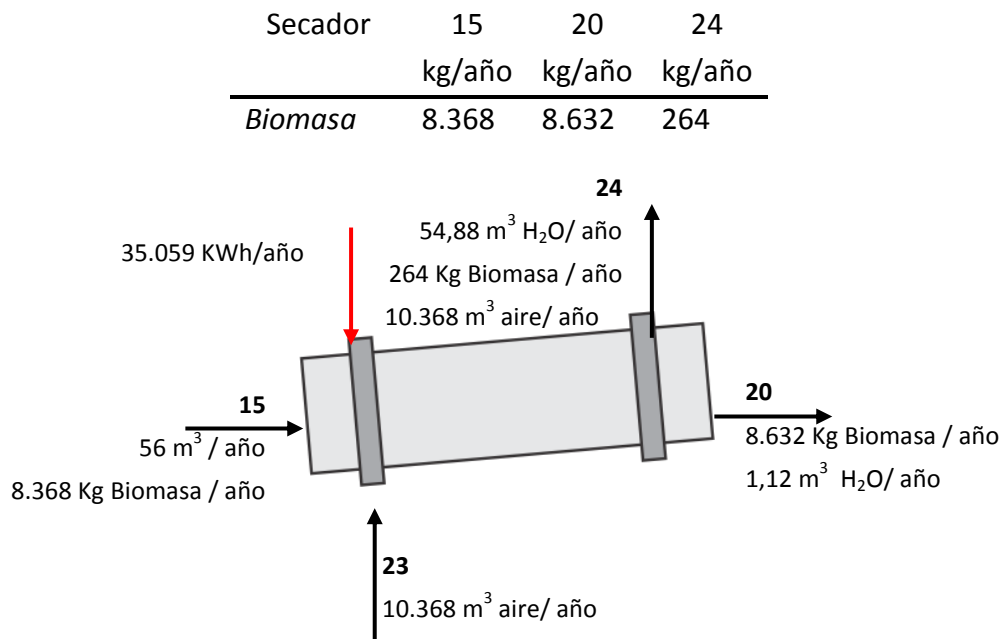
Centrífuga	12 kg/año	16 kg/año	15 kg/año
<i>Biomasa</i>	8.809	441	8.368



## FILTRO

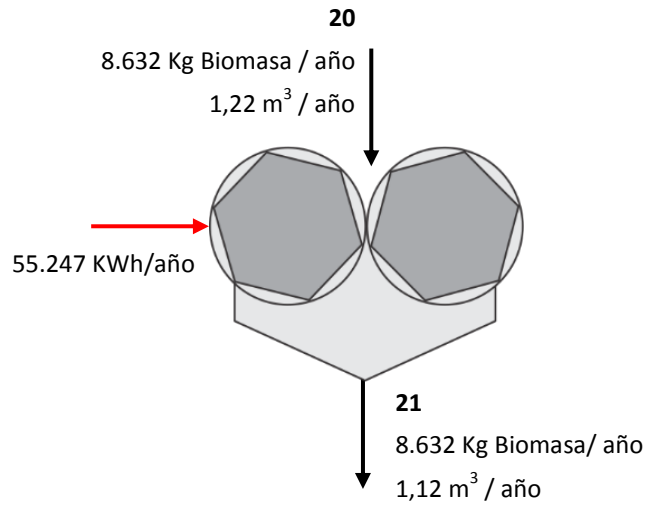


## SECADOR



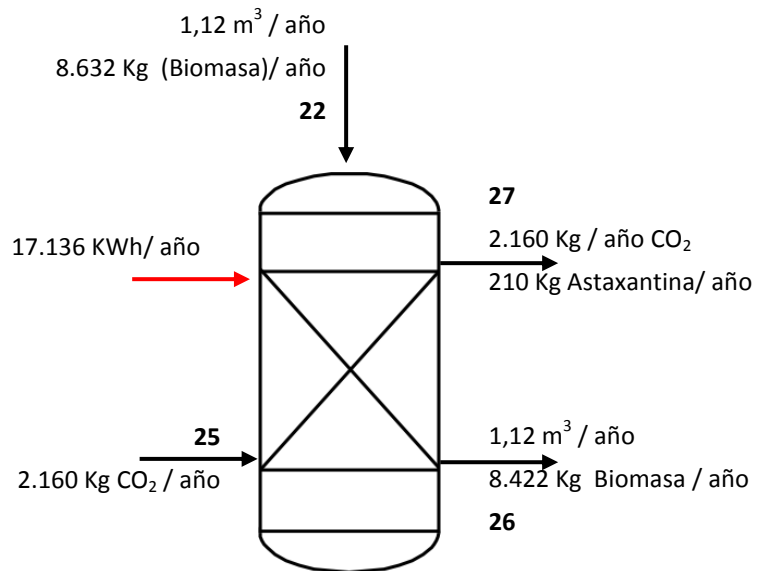
## MOLINO DE BOLAS

Molino	16	30
	kg/año	kg/año
<i>Biomasa</i>	8.632	8.632



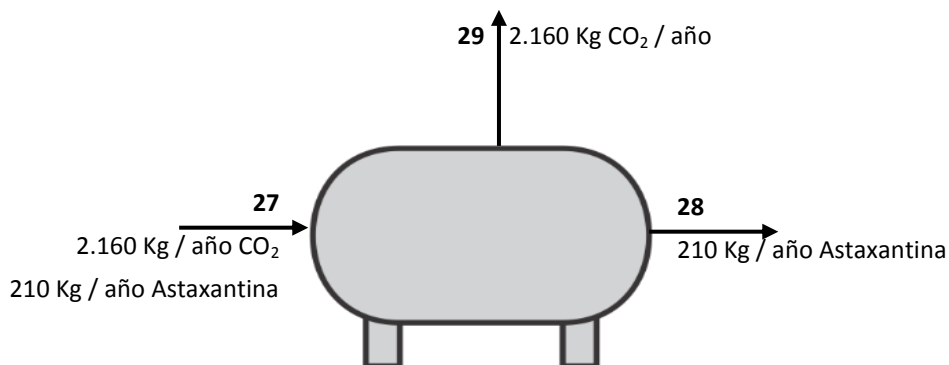
### EXTRACCIÓN SUPERCRÍTICA

Extracción	22 kg/año	25 kg/año	26 kg/año	27 kg/año
<i>Biomasa</i>	8.632		8.422	
<i>CO<sub>2</sub></i>		2.160		2.160
<i>Astaxantina</i>				210



## SEPARADOR LÍQUIDO-GAS

Separador	27 Kg/año	29 Kg/año	28 Kg/año
CO <sub>2</sub>	2.160	2.160	
Astaxantina	210		210



### 3.3. ANÁLISIS FINANCIERO

Se realizó el análisis financiero al mejor escenario que consta de: iluminación natural y sistema híbrido Flat panel con las variantes de: *D. salina* para ciudades costeras y para *H. Pluvialis* todas las ciudades con medio de cultivo sintético.

Se hace referencia a los costos que se mantienen constante independientemente del carotenoide a producir, El costo de tratamiento de residuos ( $C_{WT}$ ) tomó un valor de € 586/ anual y el salario mínimo en Colombia en el 2017 es de € 237 /mes, la mano de obra profesional ( $H_Q$ ) equivale a € 4.3/hora y la técnica ( $L_Q$ ) a € 2,8 /hora<sup>35</sup> generando un costo de personal ( $C_{OL}$ )

<sup>35</sup> JIMÉNEZ, F. (2017). Así quedó el salario mínimo para 2017. [www.elcolombiano.com](http://www.elcolombiano.com). Retrieved 14 July 2017, from <http://www.elcolombiano.com/negocios/economia/salario-minimo-2017-en-colombia-BN5681232>

de € 11 248/anual. Para el costo de capital (FCI) se buscó el precio del terreno y de los equipos (**ANEXO H**) que hacen parte del sistema de producción, el precio unitario de servicios como agua y electricidad se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1. Costos de electricidad, agua y terreno para las 5 ciudades.**

Ciudad	Electricidad [€/ kW/h]	Agua [€/m <sup>3</sup> ]	Costo [ €/ha ]
Barrancabermeja	0,19 <sup>36</sup>	0,92 <sup>37</sup>	208.467
Barranquilla	0,15 <sup>38</sup>	1 <sup>39</sup>	61.507
Cartagena	0,15 <sup>37</sup>	0,73 <sup>40</sup>	127.325
Cúcuta	0,14 <sup>41</sup>	0,96 <sup>42</sup>	481.078
Santa Marta	0,15 <sup>37</sup>	0,69 <sup>43</sup>	117.607

Los costos de los servicios industriales ( $C_{UT}$ ) compuestos por Agua, electricidad, medio de suspensión y CO<sub>2</sub> para un año de producción se muestran en la tabla 2 y 3 para  $\beta$ -caroteno y astaxantina respectivamente , el medio de suspensión que se escogió fue el aceite de oliva que tiene un costo

<sup>36</sup> "Tarifas 2017." ESSA, 2017, Retrieved 5 July 2017, from [http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202017/Tarifa\\_ESSA\\_201703.pdf](http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202017/Tarifa_ESSA_201703.pdf).

<sup>37</sup> SALAZAR, S. Barrancabermeja, S.(2017). Subió la tarifa del agua en Barrancabermeja. Vanguardia.com. Retrieved 26 July 2017, from <http://www.vanguardia.com/santander/barrancabermeja/378560-subio-la-tarifa-del-agua-en-barrancabermeja>

<sup>38</sup> ELECTRICARIBE.Tarifas 2017. (2017). Retrieved 5 July 2017, from [http://www.electricaribe.com/servlet/ficheros/1297155457648/4-17cons03-17publicadael15deMarzo\\_2017.pdf](http://www.electricaribe.com/servlet/ficheros/1297155457648/4-17cons03-17publicadael15deMarzo_2017.pdf)

<sup>39</sup> DATACUCUTA (2017). El Costo de la energía eléctrica en Norte de Santander. Retrieved 12 July 2017, from <http://www.datacucuta.com/index.php/estudios-sectoriales/costo-de-energia-electrica/537-energia-electrica>

<sup>40</sup> ACUACAR. Tarifas. (2017). Retrieved 12 July 2017, from <https://www.acuacar.com/Oficinavirtual/Conozcasufactura/Tarifas.aspx>

<sup>41</sup> DATACUCUTA (2017). El Costo de la energía eléctrica en Norte de Santander. Retrieved 12 July 2017, from <http://www.datacucuta.com/index.php/estudios-sectoriales/costo-de-energia-electrica/537-energia-electrica>

<sup>42</sup> AGUAS KPITAL CUCUTA Tarifas 2017. (2017).Retrieved 26 July 2017, from <http://www.akc.com.co/akc/index.php/servicio-al-cliente/tarifas>

<sup>43</sup> METROAGUA Tarifas 2017. (2017). Retrieved 3 July 2017, from [http://www.metroagua.com.co/wordpress/?page\\_id=790](http://www.metroagua.com.co/wordpress/?page_id=790)

aproximado de € 4/kg<sup>44</sup>; su cantidad depende de la concentración a la cual se requiere el carotenoide debido que en el mercado no se comercializa este producto al 100% y el CO<sub>2</sub> con un 99% de pureza utilizado en la etapa de extracción tiene un valor de € 0,39/kg<sup>45</sup>. Se encontró que el valor de N es € 1,02/kg y de P es de € 9,21/kg para el rubro de materias primas (C<sub>RM</sub>) (ANEXO I).

**Tabla 2. Costo de capital (FCI), Costo de materias primas (C<sub>RM</sub>) y costos de servicios industriales (C<sub>UT</sub>) para β-caroteno**

Ciudad	FCI [€]	C <sub>RM</sub> [€]	C <sub>UT</sub> 5% [€]	C <sub>UT</sub> 15% [€]	C <sub>UT</sub> 20% [€]
Barranquilla	1.940.765	16.812	269.278	266.079	264.476
Santa Marta	2.021.443	22.197	274.539	270.018	267.757
Cartagena	2.026.313	20.093	270.536	266.655	264.474

**Tabla 3. Costo de capital (FCI), Costo de materias primas (C<sub>RM</sub>) y costos de servicios industriales (C<sub>UT</sub>) para astaxantina**

Ciudad	FCI [€]	C <sub>RM</sub> [€]	C <sub>UT</sub> 5% [€]	C <sub>UT</sub> 15% [€]	C <sub>UT</sub> 20% [€]
Barrancabermeja	1.987.202	5.703.732	336.491	361.141	333.020
Barranquilla	1.918.142	5.703.732	273.023	265.945	263.585
Cartagena	1.917.180	5.703.317	271.084	264.224	261.938
Cúcuta	2.067.796	5.705.215	278.449	268.370	265.010
Santa Marta	1.923.551	5.704.232	276.612	268.201	265.397

Como se puede ver en las tablas 2 y 3, el FCI en ambos casos es variable, esto se debe a que además de los costos de equipos se suma el costo de terreno y

<sup>44</sup> VIDAL MATÉ, R. (2017). El aceite de oliva alcanza precios máximos en una década. EL PAÍS. Retrieved 12 July 2017, from [https://economia.elpais.com/economia/2017/02/17/actualidad/1487358621\\_373669.html](https://economia.elpais.com/economia/2017/02/17/actualidad/1487358621_373669.html)

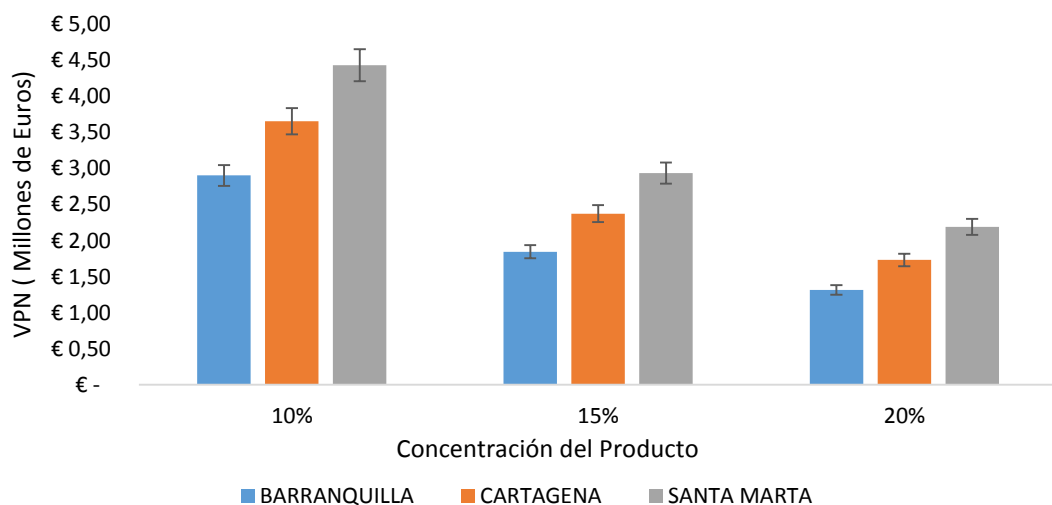
<sup>45</sup> SENDECO2. Precios CO<sub>2</sub> - Sendeco2. (2017). Retrieved 20 July 2017, from <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

este cambia acorde a la ciudad donde se situó la planta; para el caso de astaxantina, el  $C_{RM}$  no muestra una diferencia significativa ya que el mayor aporte lo realiza el medio sintético que comparado con los costos de luz y agua son insignificantes. Como se mencionó anteriormente el producto no se vende al 100% de pureza, para la disolución de este se empleó aceite de oliva, el costo de estas presentaciones se evidencian en el  $C_{UT}$  (Tablas 2 y 3) que variaran de acuerdo a la presentación de venta. Debido a que no se puede evidenciar una diferencia en el  $C_{UT}$ , se analizaron estos costos en un flujo de caja que determino la ciudad factible para la creación de la planta productora de antioxidantes.

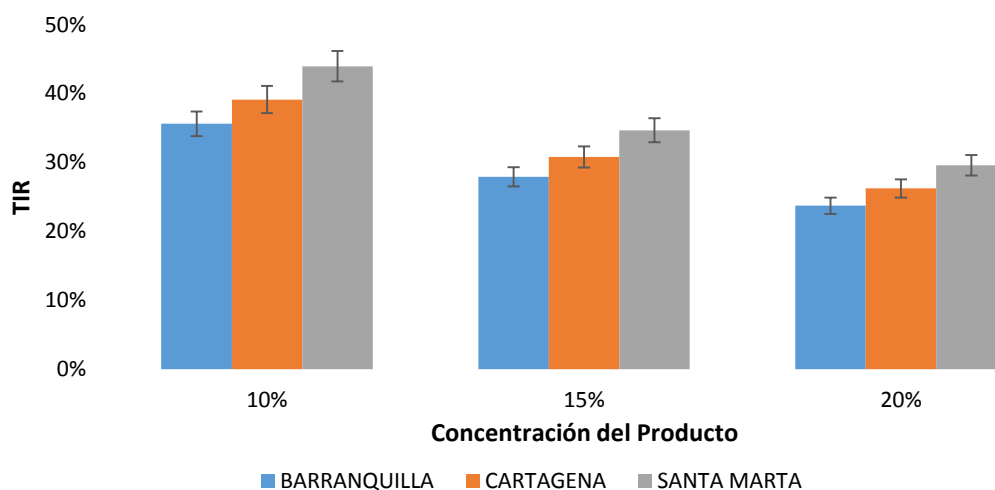
### 3.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se realizó un flujo de caja presente y presente acumulado para el escenario escogido para evaluar los indicadores de factibilidad: Valor presente neto (VPN), Tasa interna de Retorno (TIR) Y años de recuperación de la inversión (Pay Back).

**Gráfica 8. Valor presente neto (VPN) para la producción y extracción de  $\beta$ -caroteno**

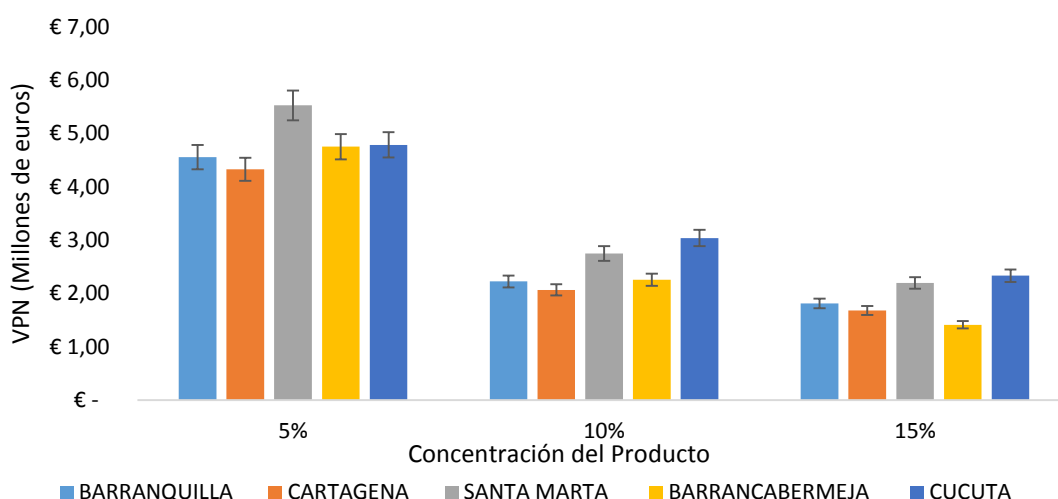


**Gráfica 9. Tasa Interna de Retorno (TIR) para la producción y extracción de  $\beta$ -caroteno**

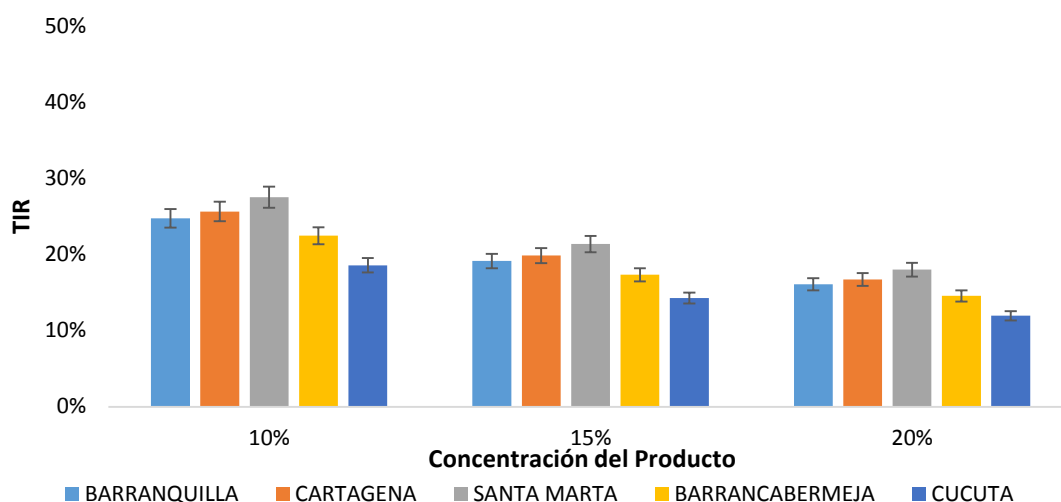


Según las gráficas 8 y 9 se evidenció que la mejor locación para la producción de  $\beta$ -caroteno es Santa Marta con un VPN € 4.428.442 (15.623.144.816 COP), TIR de 44% y Pay Back de 3,8 años.

**Gráfica 10. Valor presente neto (VPN) para la producción y extracción de astaxantina.**



**Gráfica 11. Tasa Interna de Retorno (TIR) para la producción y extracción de astaxantina**



Se analizó las gráficas 10, 11 dando como resultado la ciudad de Santa Marta para la producción de astaxantina con un VPN € 5.529.203 (19.506.530.556 COP), Pay Back de 1,9 años y TIR de 50%, esta última siendo mayor que la tasa de oportunidad (12%) reportada por el banco de la República. Para escoger la presentación del producto para su venta, se tuvo en cuenta el precio de equilibrio del proyecto comparado con los precios de venta en el mercado global. El precio de venta para el  $\beta$ -caroteno sintético tiene un costo de € 516 /kg y en su forma natural dobla este valor que según el tipo de industria varía este precio. Ya que en Colombia no existe ninguna empresa productora de estos carotenoides, para ser aceptada por los posibles clientes, una estrategia de mercado es vender el producto en el menor precio posible, se obtuvo un precio de equilibrio de € 205,82 /kg a una concentración del 10%. El valor de la astaxantina en el mercado está entre € 2580 - € 6020/ kg, se obtuvo un valor mínimo de venta de €1537/ kg a una concentración del 5%.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados del mercado evidenció la viabilidad de implementación de una planta productora de carotenoides debido a que la demanda es alta y la oferta es nula.

En los resultados obtenidos para la producción de biomasa a partir de la conformación de los sistemas híbridos, se observó que la mayor producción de biomasa se presenta en el PBR flat panel + Open Pond con una cantidad de 8758 kg biomasa/año y 8422 kg biomasa/año para el  $\beta$ -caroteno y astaxantina respectivamente.

Se decidió como medio de cultivo para *D. salina* el ambiente marino enriquecido pues minimizó los costos de operación en un valor de € 6.070.294 (21.429.562.546 COP) para *H. pluvialis*.

Se obtuvo que la mejor locación para la planta de producción de  $\beta$ -caroteno y astaxantina es Santa Marta, Magdalena. La inversión inicial para la planta de  $\beta$ -caroteno es € 2.021.443 (7.131.468.974 COP), un costo de operación anual de € 302.432 (1.066.952.877 COP) para una concentración del 10% y los indicadores de factibilidad para este proyecto fueron: VPN: € 4.428.442 (15.623.144.816 COP), TIR: 44% y PB: 3 años y 9 meses.

Para la planta de astaxantina se necesita una inversión inicial de € 1.923.551 un costo de operación anual de € 5.992.620 (19.730.260.024 COP) para una concentración del 5% y los indicadores de factibilidad para este proyecto fueron: VPN: € 5.529.203 (19.506.530.556 COP), TIR: 50% y PB: 1 año y 9 meses.

La planta de producción de  $\beta$ -caroteno tiene una capacidad de 339 kg puros anuales traducidos a 3391 unidades en presentación de 10%. En el caso de la astaxantina se produjo anualmente 210 kg puros vistos en 4206 unidades a una concentración de 5%.

## 5. RECOMENDACIONES

Para aumentar la producción de Biomasa en el cultivo de *D. salina* se recomienda simular el proceso de producción con un medio f/2 en agua de mar. Así mismo una óptima distribución de un sistema de iluminación artificial.

Implementar un sistema de extracción paralelo para la recuperación de carotenoides como la Luteína y Zeaxantina.

Modificar la línea de producción agregando una etapa seguida de la extracción para la recuperación de glicerol que se encuentra en la biomasa residual ya que la *D. salina* posee un 20% de este compuesto.

Se recomienda evaluar a escala laboratorio cada una de las etapas e ir escalando con el fin de disminuir el grado de incertidumbre.

## BIBLIOGRAFÍA

ABD EL-BAKY, Hanaa H. EL-BAROTY, Gamal S. "WITHDRAWN: Enhancement Of Carotenoids In Dunaliella Salina For Use As Dietary Supplements And In The Preservation Foods." Food And Chemical Toxicology, 2010, Elsevier BV, doi:10.1016/j.fct.2010.04.025.

ABE, Katsuya et al. "Accumulation And Antioxidant Activity Of Secondary Carotenoids In The Aerial Microalga Coelastrella Striolata Var. Multistriata." Food Chemistry, vol 100, no. 2, 2007, pp. 656-661. Elsevier BV, doi:10.1016/j.foodchem.2005.10.026.

ACUACAR. Tarifas. (2017). Retrieved 12 July 2017, from <https://www.acuacar.com/Oficinavirtual/Conozcasufactura/Tarifas.aspx>

AGUAS KPITAL CUCUTA Tarifas 2017. (2017). Retrieved 26 July 2017, from <http://www.akc.com.co/akc/index.php/servicio-al-cliente/tarifas>

BEN-AMOTZ, A. et al. "Stereoisomers Of  $\beta$ -Carotene And Phytoene In The Alga Dunaliella Bardawil." PLANT PHYSIOLOGY, vol 86, no. 4, 1988, pp. 1286-1291. American Society Of Plant Biologists (ASPB), doi:10.1104/pp.86.4.1286.

BOROWITZKA, M. "Dunaliella: Biology, Production, and Markets. In: Richmond A", Hu Q (eds) Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology, Second Edition. Blackwell, pp 359-368. (2013).

CHITTCHANG, Uraiporn et al. "Recommending Vitamin A—Rich Foods In Southern Thailand." Food And Nutrition Bulletin, vol 20, no. 2, 1999, pp. 238-242. SAGE Publications, doi:10.1177/156482659902000210.

CHRISTENSON, Logan. SIMS, Ronal. "Production And Harvesting Of Microalgae For Wastewater Treatment, Biofuels, And Bioproducts." *Biotechnology Advances*, vol 29, no. 6, 2011, pp. 686-702. Elsevier BV, doi:10.1016/j.biotechadv.2011.05.015.

CORDOBA ASTROC, Nancy et al. "Obtención Y Caracterización De Astaxantina De La Microalga Haematococcus Pluvialis." *Ugciencia*, vol 21, 2016, p. 73. Universidad La Gran Colombia, doi:10.18634/ugcj.21v.1i.426.

DATAUCUTA (2017). El Costo de la energía eléctrica en Norte de Santander. Retrieved 12 July 2017, from <http://www.dataucuta.com/index.php/estudios-sectoriales/costo-de-energia-electrica/537-energia-electrica>

DEL CAMPO, José A. et al. "Outdoor Cultivation Of Microalgae For Carotenoid Production: Current State And Perspectives." *Applied Microbiology And Biotechnology*, vol 74, no. 6, 2007, pp. 1163-1174. Springer Nature, doi:10.1007/s00253-007-0844-9.

DOMÍNGUEZ A, F. "Astaxantina, el oro rojo de la microalga Haematococcus pluvialis". *Algas. Boletín Nacional de Ficología*, 4-8. (2006).

EDGE, R. et al. "The Carotenoids As Anti-Oxidants — A Review." *Journal Of Photochemistry And Photobiology B: Biology*, vol 41, no. 3, 1997, pp. 189-200. Elsevier BV, doi:10.1016/s1011-1344(97)00092-4.

ELECTRICARIBE.Tarifas 2017. (2017). Retrieved 5 July 2017, from [http://www.electricaribe.com/servlet/ficheros/1297155457648/4-17cons03-17publicadael15deMarzo\\_2017.pdf](http://www.electricaribe.com/servlet/ficheros/1297155457648/4-17cons03-17publicadael15deMarzo_2017.pdf)

ESSA . Tarifas 2017, 2017, Retrieved 5 July 2017, from [http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202017/Tarifa\\_ES\\_SA\\_201703.pdf](http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202017/Tarifa_ES_SA_201703.pdf).

GARCÍA-GONZÁLEZ, M. et al. "Conditions For Open-Air Outdoor Culture Of Dunaliella Salina In Southern Spain." *Journal Of Applied Phycology*, vol 15, no. 2/3, 2003, pp. 177-184. Springer Nature, doi:10.1023/a:1023892520443.

GOMEZ, P. I. et al. "From Genetic Improvement To Commercial-Scale Mass Culture Of A Chilean Strain Of The Green Microalga Haematococcus Pluvialis With Enhanced Productivity Of The Red Ketocarotenoid Astaxanthin." *Aob Plants*, vol 5, no. 0, 2013, pp. plt026-plt026. Oxford University Press (OUP), doi:10.1093/aobpla/plt026.

GONG, Mengyue. BASSI, Amarjeet "Carotenoids From Microalgae: A Review Of Recent Developments." *Biotechnology Advances*, vol 34, no. 8, 2016, pp. 1396-1412. Elsevier BV, doi:10.1016/j.biotechadv.2016.10.005.

GUEDES, Ana Catarina et al. "Microalgae As Sources Of Carotenoids." *Marine Drugs*, vol 9, no. 12, 2011, pp. 625-644. MDPI AG, doi:10.3390/md9040625.

GUERIN, Martin et al. "Haematococcus Astaxanthin: Applications For Human Health And Nutrition." *Trends In Biotechnology*, vol 21, no. 5, 2003, pp. 210-216. Elsevier BV, doi:10.1016/s0167-7799(03)00078-7.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, Alexi. LABBÉ, José I. "Microalgas, Cultivo Y Beneficios." *Revista De Biología Marina Y Oceanografía*, vol 49, no. 2, 2014, pp. 157-173. Scielo Comision Nacional De Investigacion Cientifica Y Tecnologica (CONICYT), doi:10.4067/s0718-19572014000200001.

HIGUERA-CIAPARA, I. et al. "Astaxanthin: A Review of its Chemistry and Applications". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(2), pp.185-196. (2006).

HSU, Yu-Wen et al. "Protective Effects Of *Dunaliella Salina* – A Carotenoids-Rich Alga, Against Carbon Tetrachloride-Induced Hepatotoxicity In Mice." *Food And Chemical Toxicology*, vol 46, no. 10, 2008, pp. 3311-3317. Elsevier BV, doi:10.1016/j.fct.2008.07.027.

JANG, Hae-Rim et al. "Production Of Biomass And Bioactive Compounds From Shoot Cultures Of *Rosa Rugosa* Using A Bioreactor Culture System." *Horticulture, Environment, And Biotechnology*, vol 57, no. 1, 2016, pp. 79-87. Springer Nature, doi:10.1007/s13580-016-0111-z.

JIMÉNEZ, F. (2017). Así quedó el salario mínimo para 2017. [www.elcolombiano.com](http://www.elcolombiano.com). Retrieved 14 July 2017, from <http://www.elcolombiano.com/negocios/economia/salario-minimo-2017-en-colombia-BN5681232>

JOHNSON, E.A. et al. *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*. Fiechter, vol. 53, 1995, pp. 119–17, Springer-Verlag, Berlin.

LEÓN, R. "Microalgae Mediated Photoproduction Of B-Carotene In Aqueous–Organic Two Phase Systems." *Biomolecular Engineering*, vol 20, no. 4-6, 2003, pp. 177-182. Elsevier BV, doi:10.1016/s1389-0344(03)00048-0.

LI, Jian et al. "An Economic Assessment Of Astaxanthin Production By Large Scale Cultivation Of *Haematococcus Pluvialis*." *Biotechnology Advances*, vol 29, no. 6, 2011, pp. 568-574. Elsevier BV, doi:10.1016/j.biotechadv.2011.04.001.

LORENZ, R.Todd, et al. "Commercial Potential For Haematococcus Microalgae As A Natural Source Of Astaxanthin." Trends In Biotechnology, vol 18, no. 4, 2000, pp. 160-167. Elsevier BV, doi:10.1016/s0167-7799(00)01433-5.

MACÍAS-SÁNCHEZ, M.D. et al. "Supercritical Fluid Extraction Of Carotenoids From Scenedesmus Almeriensis." Food Chemistry, vol 123, no. 3, 2010, pp. 928-935. Elsevier BV, doi:10.1016/j.foodchem.2010.04.076.

MATTEA, Facundo et al. "Carotenoid Processing With Supercritical Fluids." Journal Of Food Engineering, vol 93, no. 3, 2009, pp. 255-265. Elsevier BV, doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.01.030.

MENDES, Rui L. et al. "Supercritical Carbon Dioxide Extraction Of Compounds With Pharmaceutical Importance From Microalgae." Inorganica Chimica Acta, vol 356, 2003, pp. 328-334. Elsevier BV, doi:10.1016/s0020-1693(03)00363-3.

METROAGUA Tarifas 2017. (2017). Retrieved 3 July 2017, from [http://www.metroagua.com.co/wordpress/?page\\_id=790](http://www.metroagua.com.co/wordpress/?page_id=790)

NORSKER, Niels-Henrik et al. "Microalgal Production — A Close Look At The Economics." Biotechnology Advances, vol 29, no. 1, 2011, pp. 24-27. Elsevier BV, doi:10.1016/j.biotechadv.2010.08.005.

PULZ, Otto. GROSS, Wolfgang. "Valuable Products From Biotechnology Of Microalgae." Applied Microbiology And Biotechnology, vol 65, no. 6, 2004, pp. 635-648. Springer Nature, doi:10.1007/s00253-004-1647-x.

RABBANI, Said et al. "Induced B-Carotene Synthesis Driven By Triacylglycerol Deposition In The Unicellular Alga Dunaliella Bardawil." Plant Physiology, vol 116, no. 4, 1998, pp. 1239-1248. American Society Of Plant Biologists (ASPB), doi:10.1104/pp.116.4.1239.

ROLDÁN, P. L. "Efecto del Consumo de Astaxantina en la Salud". Recuperado el Mayo de 2015, de Universitat Oberta de Catalunya. (2012).

SALAZAR, S. Barrancabermeja, S.(2017). Subió la tarifa del agua en Barrancabermeja. Vanguardia.com. Retrieved 26 July 2017, from <http://www.vanguardia.com/santander/barrancabermeja/378560-subio-la-tarifa-del-agua-en-barrancabermeja>

SENDECO2. Precios CO2 - Sendeco2. (2017). Retrieved 20 July 2017, from <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

SHAH, Md.et al. "Astaxanthin-Producing Green Microalga Haematococcus Pluvialis: From Single Cell To High Value Commercial Products." Frontiers In Plant Science, vol 7, 2016, Frontiers Media SA, doi:10.3389/fpls.2016.00531.

SIEW MOI, Phang. "Handbook Of Microalgal Culture. Biotechnology And Applied Phycology." Journal Of Applied Phycology, vol 16, no. 2, 2004, pp. 159-160. Springer Nature, doi:10.1023/b:japh.0000044943.45511.5e.

TRIPLE A S.A. (2017). Tarifas 2017. Retrieved 10 July 2017, from [http://www.aguasyaguas.com.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=35&Itemid=219](http://www.aguasyaguas.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=35&Itemid=219)

VIDAL MATÉ, R. (2017). El aceite de oliva alcanza precios máximos en una década. EL PAÍS. Retrieved 12 July 2017, from [https://economia.elpais.com/economia/2017/02/17/actualidad/1487358621\\_373669.html](https://economia.elpais.com/economia/2017/02/17/actualidad/1487358621_373669.html)

WATERS. "About Algae | Enalgae." Enalgae.Eu, 2017, <http://www.enalgae.eu/about-algae.htm>.

WSC HORIZONTAL BEAD MILL/Sand Mill For Paint And Ink - Buy Sand Mill,Horizontal Sand Mill,Grinding Mill For Paint And Ink Product On Alibaba.Com." Www.Alibaba.Com, 2017, [http://www.alibaba.com/product-detail/WSC-horizontal-bead-mill-sand-mill\\_60107452537.html?s=p](http://www.alibaba.com/product-detail/WSC-horizontal-bead-mill-sand-mill_60107452537.html?s=p).

[46] Subitec ist Technologieanbieter zur Herstellung und Nutzung von Algenbiomasse | Subitec GmbH Stuttgart. (2017). Subitec.com. Retrieved 20 July 2017, from <http://subitec.com/de>

[47] Alibaba.com en Español: Directorio de Proveedores y Fabricantes Internacionales en Español. (2017). Spanish.alibaba.com.. Retrieved 19 July 2017, from <http://Spanish.alibaba.com>.

[48] Philips Lighting - Soluciones de iluminación convencional y LED. (2017). Lighting.philips.com.co.. Retrieved 20 July 2017, from <http://Lighting.philips.com.co>.

[49] Home - Evodos Dynamic Settlers. (2017). Evodos Dynamic Settlers. Retrieved 19 July 2017, from <http://www.evodos.eu/>

[50] NP Ingenieria de Aguas | tratamiento de aguas | analisis fisicoquimicos | analisis microbiologicos. (2017). Npingenieriadeaguas.co. Retrieved 8 July 2017, from <http://Npingenieriadeaguas.co>

[51] Apeks Supercritical | CO2 Extraction Systems | Oil Extractors. (2017). Apeks Supercritical. Retrieved 26 June 2017, from <http://www.apekssupercritical.com>

## ANEXOS

### ANEXO A. Datos de Irradiación global, Temperatura Promedio, precipitación y evaporación promedio.

**Tabla A 1. Temperatura promedio, Precipitación, Evaporación e Irradiación solar para la ciudad de Cartagena.**

	Temperatura promedio[°C]	Precipitación [mm día]	Evaporación [mm día]	Irradiación solar[J/cm <sup>2</sup> ]
<b>Enero</b>	26,7	15,8	167	67.406,4
<b>Febrero</b>	27,4	17,4	172	63.302,4
<b>Marzo</b>	27,7	28,5	194	72.093,6
<b>Abril</b>	26,8	77,1	182	66.852
<b>Mayo</b>	26,4	151,9	163	69.477,2
<b>Junio</b>	26,6	138,6	148	61.344
<b>Julio</b>	26,5	137,3	159	65.620,8
<b>Agosto</b>	26,4	147,3	156	59.706
<b>Septiembre</b>	26	174,3	142	53.568
<b>Octubre</b>	25,9	204,3	137	55.911,6
<b>Noviembre</b>	25,9	133,0	131	58.104
<b>Diciembre</b>	25,9	59,8	147	63.946,8

**Tabla A 2. Temperatura promedio, Precipitación, Evaporación e Irradiación solar para la ciudad de Santa Marta.**

	Temperatura promedio[°C]	Precipitación [mm día]	Evaporación [mm día]	Irradiación solar[J/cm <sup>2</sup> ]
<b>Enero</b>	25,1	8,4	193	68.857,2
<b>Febrero</b>	25,4	9,2	188	66.830,4
<b>Marzo</b>	25,8	15,8	209	78.008,4
<b>Abril</b>	25,6	45	195	73.872
<b>Mayo</b>	25,8	103,2	174	69.526,8
<b>Junio</b>	26	83,4	159	67.932
<b>Julio</b>	25,8	76,9	164	73.879,2
<b>Agosto</b>	25,9	100,8	159	72.986,4
<b>Septiembre</b>	25,7	134,1	157	65.340
<b>Octubre</b>	25,6	158,7	150	62.161,2
<b>Noviembre</b>	25,5	88,8	136	58.536
<b>Diciembre</b>	25,1	38,8	159	62.496

**Tabla A 3. Temperatura promedio, Precipitación, Evaporación e Irradiación solar para la ciudad de Barranquilla.**

	<b>Temperatura promedio[°C]</b>	<b>Precipitación [mm día]</b>	<b>Evaporación [mm día]</b>	<b>Irradiación solar[J/cm<sup>2</sup>]</b>
<b>Enero</b>	25,6	16,1	179	62.830,8
<b>Febrero</b>	26,7	20,2	180	57.456
<b>Marzo</b>	27,4	30,7	209	65.620,8
<b>Abril</b>	26,2	86,1	192	59.508
<b>Mayo</b>	25,7	151	166	56.804,4
<b>Junio</b>	25,8	167,8	152	56.592
<b>Julio</b>	25,7	122,1	166	60.598,8
<b>Agosto</b>	25,7	141,4	163	59.706
<b>Septiembre</b>	25,3	170,1	136	53.784
<b>Octubre</b>	25	194,1	120	52.117,2
<b>Noviembre</b>	24,8	119,4	125	50.760
<b>Diciembre</b>	24,7	54,6	150	56.358

**Tabla A 4. Temperatura promedio, Precipitación, Evaporación e Irradiación solar para la ciudad de Barrancabermeja.**

	<b>Temperatura promedio[°C]</b>	<b>Precipitación [mm día]</b>	<b>Evaporación [mm día]</b>	<b>Irradiación solar[J/cm<sup>2</sup>]</b>
<b>Enero</b>	23,3	41,2	143	59.482,8
<b>Febrero</b>	24,6	60,2	60	53.827,2
<b>Marzo</b>	24,4	99,5	100	58.924,8
<b>Abril</b>	23,6	190,5	191	53.568
<b>Mayo</b>	23,2	241,2	241	55.911,6
<b>Junio</b>	23,1	206,7	207	55.728
<b>Julio</b>	23,4	188,8	189	62.272,8
<b>Agosto</b>	23,6	190,7	191	61.826,4
<b>Septiembre</b>	22,9	218,4	218	57.024
<b>Octubre</b>	22,3	242,7	243	53.791,2
<b>Noviembre</b>	22,2	174,6	175	50.868
<b>Diciembre</b>	22,3	83,7	84	54.349,2

**Tabla A 5. Temperatura promedio, Precipitación, Evaporación e Irradiación solar para la ciudad de Cúcuta.**

	<b>Temperatura promedio[°C]</b>	<b>Precipitación [mm día]</b>	<b>Evaporación [mm día]</b>	<b>Irradiación solar[J/cm<sup>2</sup>]</b>
<b>Enero</b>	19,4	52,7	156	54.349,2
<b>Febrero</b>	20,4	49,56	153	48.988,8
<b>Marzo</b>	20,9	80,91	167	55.688,4
<b>Abril</b>	20,7	169,5	158	48.276
<b>Mayo</b>	20,6	229,4	195	51.894
<b>Junio</b>	20,1	207,9	220	53.136
<b>Julio</b>	20	291,96	241	56.916
<b>Agosto</b>	20,4	186	256	55.911,6
<b>Septiembre</b>	20,4	204,9	220	54.216
<b>Octubre</b>	20,1	222,27	185	51.670,8
<b>Noviembre</b>	19,7	156,9	145	48.060
<b>Diciembre</b>	19,2	73,16	141	51.670,8

**ANEXO B. Reactivos del medio Johnson J/1**

**Tabla B 1. Componentes y precios de solución de trazas.**

<b>Solución trazas</b>	<b>kg /m<sup>3</sup> solución</b>	<b>\$ / kg</b>	<b>\$ kg / m<sup>3</sup> solución</b>
<i>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></i>	0,62	209.000	129.580
<i>(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O</i>	0,37	2.276.000	842.120
<i>CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O</i>	0,055	163.480	8.991
<i>CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</i>	0,0475	6.944.240	329.851
<i>ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O</i>	0,085	113.460	9.644
<i>MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O</i>	0,04	436.760	17.470
		<b>TOTAL</b>	<b>1.337.657</b>

**Tabla B 2. Componentes y precios de solución de hierro.**

<b>Solución hierro</b>	<b>kg /m<sup>3</sup> solución</b>	<b>\$ / kg</b>	<b>\$ kg / m<sup>3</sup> solución</b>
<i>Na<sub>2</sub>EDTA·2H<sub>2</sub>O</i>	1,86	538.020	1.000.717.200
<i>FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O</i>	2,11	434.320	916.415.200
		<b>TOTAL</b>	<b>1.917.132.400</b>

**Tabla B 3. Componente y precio de fuente de fosforo.**

<b>Fuente de fosforo</b>	<b>kg /m<sup>3</sup> solución</b>	<b>\$ / kg</b>	<b>\$ kg / L solución</b>
<i>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></i>	34	126.270	4.293.180.000
		<b>TOTAL</b>	<b>4.293.180.000</b>

**Tabla B 4. Componentes y precio de medio de cultivo.**

Medio de cultivo	Kg/m <sup>3</sup> solución	\$ kg	\$ Kg/ m <sup>3</sup> solución
<i>NaCl</i>	116,88	35.000	4.090.800
<i>MgCl<sub>2</sub></i>	0,7	242.780	169.946
<i>MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O</i>	0,5	115.000	57.500
<i>KCl</i>	0,2	91.500	18.300
<i>CaCl<sub>2</sub></i>	0,18	236.000	42.480
<i>KNO<sub>3</sub></i>	1	410.000	410.000
<i>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></i>			4.293.180
<i>Solución de Hierro</i>			1.917.132
<i>Solución de trazas</i>			1.337.657
		<b>TOTAL</b>	<b>12.336.996</b>

## ANEXO C. Explicación del modelo foto autotrófico

Se investiga el metabolismo foto autotrófico natural que implica el uso de la luz solar como fuente de energía y carbono inorgánico como la fuente de carbono para la formación de energía bioquímica a través de la fotosíntesis. Para la obtención de biomasa el cálculo diseñado se justifica en la producción de glucosa (GP en kg/mes) basada en la radiación global mensual (RAD en  $J/cm^2 * mes$ ), el contenido energético de la glucosa ( $E_{gluc}$  en kJ/g) y un factor de conversión para la eficiencia de la fotosíntesis ( $CF_{LG}$ ), que representa el porcentaje de radiación global absorbida por las células de algas y disponible para la producción de glucosa. El cálculo tiene en cuenta factores inhibidores del crecimiento como las temperaturas subóptimas ( $T_f$ ), la disponibilidad o ausencia de  $CO_2$  del gas de combustión ( $CO_{2f}$ ) y el uso de digestato en lugar de fertilizantes minerales ( $Dig_f$ ).

$$GP = RAD * PBR_{surf} * \frac{1}{100000} * \frac{1000}{E_{gluc}} * CF_{LG} * T_f * CO_{2f} * Dig_f \quad (1)$$

Donde  $PBR_{surf}$  equivale al área ocupada por el PBR, 100000 es un factor de conversión de J to GJ y  $cm^2$  a  $m^2$ . El factor de 1000 es usado para convertir  $E_{gluc}$  a  $\frac{GJ}{Kg}$ .

Sin embargo, la irradiación solar incidente está sometida a diversas ineficiencias y mecanismos de pérdida que reducen la absorción final de la energía solar por las células algales. Estas ineficiencias y mecanismos de pérdida se refieren a la reflexión (REFL), Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), eficiencia fotosintética (PE), eficiencia de la tierra (LEFF) y distribución de la luz durante el día ( $\eta_{DISTRIBUCIÓN}$ ).

El factor de temperatura se calcula como una limitación exponencial causada por una temperatura subóptima y se basa en un modelo de crecimiento de algas por James y Boriah (2010).

$$T_f = e^{-K*(T-T_{opt})^2} \quad (2)$$

En esta ecuación se utiliza la diferencia entre la temperatura real (T) y la temperatura óptima específica de una especie ( $T_{opt}$ ) para calcular una limitación de producción.

Para la radiación solar hay que tener en cuenta que el rango de longitud de onda de la irradiación solar es muy amplio, las microalgas pueden utilizar sólo una fracción de la misma, que se denomina Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) (Richmond, 2004). PAR oscila entre 400nm-750nm que es básicamente el patrón espectral de la luz visible y corresponde aproximadamente al 40-45% del espectro luminoso total. (Richmond, 2004; Orosz & Forney, 2008; Iersel et al., 2009). Las longitudes de onda fuera de este rango no pueden ser absorbidas por las microalgas.

El siguiente paso es la conversión de glucosa en materia seca ( $Biomasa_{prod}$  en kg). El cálculo asociado se basa en una publicación de Vertregt & Penning de Vries (1987) que estableció una relación entre la producción de materia seca y la composición de esa materia seca en una gran variedad de plantas terrestres. Suponemos que las algas podrían estar siguiendo la misma relación. Los parámetros de conversión que describen la necesidad de glucosa en kg por kg de componente celular ( $GF_x$ ) se da en ANEXO C.

$$Biomasa_{prod} = \frac{GP}{(GF_{carbohidratos} * \%_{carbohidratos}) + (GF_{lipidos} * \%_{lipidos}) + (GF_{proteina} * \%_{proteina}) + (GF_{ceniza} * \%_{ceniza})} \quad (2)$$

En el cultivo de algas pueden ocurrir accidentes y la necesidad de limpieza. El modelo tiene en cuenta esto como el número de accidentes/limpieza, la cantidad de mano de obra y el tiempo de inactividad de producción resultante. Se considera que la biomasa y el medio de cultivo después de un accidente son desechos. Debido a que los accidentes son impredecibles, el número de accidentes se convierte en factores de producción y de tiempo de inactividad de cultivo que pueden utilizarse para dividir el efecto de los accidentes durante todo el periodo de producción. El factor de tiempo de inactividad de la

producción  $CPF_{cenizas}$  se utiliza para convertir el potencial de producción de  $Biomasa_{prod}$  en  $Biomasa_{real}$

$$CPF_{cenizas} = \frac{365 - N_c * DT_c}{365} \quad (3)$$

Donde  $N_c$  es igual al número de accidentes y / o eventos de limpieza y  $DT_c$  es igual al tiempo de inactividad en días por accidente y/o evento. Ahora  $Biomasa_{real}$  se puede calcular de la siguiente manera:

$$Biomasa_{real} = Biomasa_{prod} * CPF_{cenizas} \quad (4)$$

La densidad máxima de algas ( $\rho_x$  en  $Kg/m^3$ ) depende del tipo de fotobiorreactor. Para un estanque abierto es de 0.3 g/L, fotobiorreactor tubular es 1.7 g/L y un fotobiorreactor plano es de 2.1 g/L.

El volumen de cultivo de algas a procesar por las centrifugadoras ( $V_{prod}$  en  $m^3 / mes$ ) se puede calcular ahora de la siguiente manera:

$$V_{prod} = \frac{Biomasa_{real}}{\rho_x} \quad (5)$$

El control de temperatura y el agua de los diferentes PBR varían fundamentalmente entre los estanques abiertos y los PBR cerrados. El enfriamiento es importante en los PBR cerrados, mientras que la evaporación sólo es relevante para los sistemas de estanques abiertos. Para los PBR cerrados se proporciona un segundo punto de ajuste de temperatura en el modelo para tener en cuenta el enfriamiento necesario del PBR tan pronto como la energía de radiación fuera mayor que la pérdida de calor potencial en la trayectoria entre la temperatura máxima permitida del cultivo y temperatura del aire en el exterior.

En la ecuación (5) se calcula el volumen mensual de cultivo de algas a procesar por las centrifugadoras. La centrífuga producirá un gránulo y un sobrenadante. El proceso de separación se rige por las siguientes consideraciones:

- La eficiencia de recuperación de biomasa ( $Biomasa_{rec}$ ) que representa la cantidad de algas en el sobrenadante con relación a la cantidad presente en el flujo de entrada.
- El porcentaje de materia seca del gránulo ( $Pdm$  en  $kg/m^3$ ).
- La concentración real de algas ( $kg/m^3$ ) en el flujo de entrada ( $\rho_x$ ).

La cantidad de pellet o pasta de algas ( $V_{cosecha}$  en  $m^3/mes$ ) ahora se puede calcular como:

$$V_{cosecha} = \frac{V_{prod} * Biomasa_{rec} * C_x}{Pdm} \quad (6)$$

$C_x$  tiene un valor típico de 150 kg biomasa seca  $/m^3$ , un valor experimentalmente establecido a partir de la planta piloto de algas en Lelystad.

$V_{diario}$  se utiliza para determinar la capacidad de centrífuga requerida con base en el mes con la entrada diaria más alta a la centrífuga y una capacidad adicional del 10% para hacer frente a las variaciones que inevitablemente ocurrirán. Esta capacidad de centrífuga es la entrada para los bienes de capital y por lo tanto el cálculo de la inversión. Además,  $V_{diario}$  se utiliza para calcular el consumo de energía y la cantidad de mano de obra para la cosecha.

En el modelo, el sobrenadante es un flujo de retorno al PBR para ahorrar en el uso del agua. Es aconsejable devolver sólo una parte del sobrenadante y permitir así la toma de agua fresca en el PBR. En el modelo se introduce un parámetro para regular el porcentaje de sobrenadante que regresa al PBR. Cuanto mayor sea el porcentaje, menor será el uso total de agua de la producción de algas y viceversa.

El consumo de gases de combustión se calcula a partir de la cantidad de biomasa de algas producida a partir de un contenido de carbono estimado de

materia seca (0,54 g / g). Se calcula la cantidad de gas de combustión consumida calculando la eficiencia estimada de CO<sub>2</sub> (expresada como un porcentaje del suministro de CO<sub>2</sub>) y el contenido de CO<sub>2</sub> de los gases de combustión.

El consumo de agua se basa en lo siguiente:

- Pérdida de agua por accidentes o limpieza.
- Agua residual de la centrífuga (agua que no regresa al PBR).
- Salida de agua en el producto final.
- Para un estanque abierto PBR, la evaporación del agua y la lluvia se contabilizan mientras que en un PBR cerrado el requerimiento de enfriamiento se satisface rociando agua en el PBR.

La mano de obra se basa en las operaciones diarias y en la necesidad de trabajo adicional en caso de limpieza o accidente de PBR. El modelo distingue entre trabajo de baja calidad (LQ) y de alta calidad (HQ).

Se supone que para la limpieza y los restablecimientos relacionados con el accidente, sólo se requiere mano de obra de LQ y que para operaciones diarias se necesita una mezcla de trabajo de LQ y de HQ. La cantidad de mano de obra requerida depende de la cantidad de PBRs instalados y disminuye por unidad de PBR cuando el número de PBRs aumenta (ganancia de eficiencia). Para las operaciones diarias, el procedimiento para los cálculos del trabajo LQ se explica a continuación.

En primer lugar, se supone que la limpieza de un PBR toma alrededor de 16 horas de trabajo LQ por evento. Esto se basa en observaciones propias del proyecto Enalgae. A continuación, se calcula la cantidad de trabajo LQ (h por caída) con [9].

$$LQ_{cenizas} = PBR_n * 16 * SCf_n \quad (7)$$

En la que  $LQ_{cenizas}$  es igual a la necesidad de trabajo LQ,  $PBR_n$  es igual al número de PBRs y  $SCf_n$  representa un factor de escala dependiendo del

número de unidades PBR instaladas. Este factor se basa en el desarrollo de los costos de inversión de capital con un número creciente de PBR (suponiendo que la eficiencia de costos aumentará con el aumento de la capacidad).  $SCf$  se calcula como sigue:

$$SCf_n = \frac{C_n}{PBR_n * CC_1} \quad (8)$$

Donde  $CC_1$  es igual al costo de capital de instalar una unidad de PBR y  $CC_n$  es igual al costo de inversión de capital de n unidades.  $CC_n$  se calcula sobre la base de Sinnott et al (2005):

$$CC_n = CC_1 * PBRn^p \quad (9)$$

Donde p es un parámetro que se fija en 0.6 en nuestros cálculos. Esto es discutible ya que no hay indicación del valor de p en la construcción de algas PBRs.

La cantidad de nitrógeno y fósforo necesaria para la producción de algas se calcula a partir de la cantidad de biomasa producida y la composición elemental de la biomasa y la pérdida de nutrientes con aguas residuales. Para N se toman 0,16 g de N/ g de proteína (valor típico utilizado para convertir el contenido de nitrógeno en contenido de proteína bruta), mientras que 0,0027 g de P/g de proteína se toman de la base de datos ECO Phyllis2 utilizando la entrada de "microalgas" (<https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECNPhyllis/#algas>).

Cuando se selecciona el uso de digestato, la cantidad de digestato necesaria se calcula a partir del componente menos disponible, despreciando el posible efecto de la adición de otros componentes.

Un estanque abierto varía de un PBR cerrado especialmente de las interacciones directas entre la atmosfera y el cultivo. Esto se relaciona con la transferencia de calor y agua. La evaporación del agua del estanque y la lluvia en el estanque determinan la cantidad de agua necesaria para soportar una capa freática constante. La cantidad de lluvia se toma de los datos climáticos. Por otro lado, la evaporación se calcula sobre la base de las ecuaciones de

evaporación de una piscina de natación inactiva (Smith et al, 1994). La velocidad de evaporación ( $V_{viento}$ ), la presión de vapor de saturación a la temperatura del agua ( $P_w$ ) y la presión de vapor de saturación en el punto de rocío ( $P_a$ ) del aire calculan la velocidad de evaporación ( $M_{evap}$  en kg / m<sup>2</sup> / h). El calor latente del agua a la temperatura del estanque ( $DH_v$ ), multiplicado por la superficie de los estanques ( $A_{estanque}$ ). Debido a que los estanques de algas están mezclados y rociados, lo que seguramente influye en la tasa de evaporación.

$$M_{evap} = A_{estanque} * \frac{(30.6 + 32.1 * V_{viento}) * (P_w - P_a)}{DH_v} \quad (10)$$

En los que 30,6 y 32,1 son constantes presentadas por Smith et al. (1994).  $P_a$  (kPa) se calcula como:

$$P_a = 0.6108 * e^{\frac{17.27 * T_{aire}}{237.3 + T_{aire}}} \quad (11)$$

En el que  $T_{aire}$  es la temperatura del punto de rocío del aire. La misma ecuación puede usarse para calcular  $P_w$  mientras que  $T_{aire}$  se sustituye por  $T_w$  que representa la temperatura promedio del agua. El calor latente del agua a la temperatura del estanque ( $DH_v$  en kJ por kg) se calcula de la siguiente manera:

$$DH_v = 2500.8 - 2.36 * T_w + 0.0016 * T_w^2 - 0.00006 * T_w^3 \quad (12)$$

Que se puede encontrar en Rogers & Yau (1989). La cantidad total de evaporación mensual ( $M_{evap}$ , total) se calcula multiplicando la tasa de evaporación ( $M_{evap}$ ) por el número de horas diurnas por mes y el área (m<sup>2</sup>) involucrada.

El modelo calcula la cantidad de calor necesaria para mantener la temperatura del estanque a la temperatura objetivo. Calefacción sólo se aplica durante el día por lo que el estanque se enfría durante la noche. Se supone que la temperatura del estanque al amanecer es igual a la temperatura del aire ambiente. En el cálculo del calor requerido, las fuentes de calor implicadas son: 1) calentamiento del cuerpo de agua del estanque al amanecer, 2) calor de

evaporación, 3) pérdida de calor de radiación de onda larga a la atmósfera, 4) entrada de calor de radiación, 5) Pérdida de radiación.

Se descuidan la convección y la conducción, ya que estas fuentes son menores en relación con las demás (ver: Béchet et al, 2011).

1) Calentamiento del cuerpo de agua del estanque al amanecer: Esto supone que el cultivo se enfría durante la noche a la temperatura del aire ambiente ( $T_{min}$ ) y se calienta por la mañana a la temperatura deseada ( $T_{set}$ ). El calor necesario para hacerlo ( $H_{dawn}$ ) se calcula multiplicando la diferencia de temperatura con la capacidad calorífica específica del agua ( $C_w$ ), el volumen de agua ( $V_w$ ) y el número de días por mes (Días).

$$H_{dawn} = (T_{set} - T_{min}) * C_w * V_w * DAYS \quad (13)$$

2) El calor de evaporación ( $H_{evap}$ ) se calcula a partir de la cantidad de evaporación ( $M_{evap}$ , total) multiplicando con el calor latente de evaporación ( $DH_v$ ).

$$H_{evap} = M_{evap,total} * DH_v \quad (14)$$

3) La pérdida de calor de radiación de onda larga o radiación de estanque ( $H_{prad}$ ) se calcula según la cuarta ley de potencia de stefan-boltzmann usando emisividad y agua ( $e_w$ ), la constante de boltzmanns  $\sigma$ , la temperatura del aire ( $T_{aire}$ ), la superficie de los estanques Número de días (días) y la duración media del día (día). Este último se utiliza porque la radiación del aire sólo se contabiliza durante el día, por la noche se permite que los estanques se enfríen a la temperatura mínima que es compensada por el uso de calor en la mañana.

$$H_{prad} = -\varepsilon_w * \sigma * T_{aire} * A_{estanque} * DAYS * DAY_{time} \quad (15)$$

4) La entrada de calor de la radiación solar ( $H_{sol}$  en kWh) se toma de los datos climáticos como radiación global ( $G_{rad}$ ), multiplicada por la superficie ( $A_{estanque}$ ) y ajustada a las unidades correctas.

$$H_{sol} = G_{rad} * A_{estanque} \quad (15)$$

5) la pérdida de radiación del aire o la radiación del aire ( $HA_{rad}$  en kWh) se calcula de acuerdo con la cuarta ley de potencia de stefan-boltzmann usando emisividad de aire y agua (respectivamente  $\varepsilon_a$  y  $\varepsilon_w$ ), constante de boltzmanns  $\sigma$ , temperatura del aire ( $T_{aire}$ ), área del estanque ( $A_{estanque}$ ), el número de días (días) y la duración media del día (día).

$$H_{Arad} = \varepsilon_a * \varepsilon_w * \sigma * T_{aire} * A_{estanque} * DÍAS * DÍA_{tiempo} \quad (16)$$

El modelo para el fotobiorreactor tubular se realizó a partir del modelo de estanque abierto como punto de partida. Tanto la estructura del modelo como los cálculos se mantuvieron lo más idénticos posible.

Se modifica el cálculo del uso de calor y la necesidad de enfriamiento. Para acomodar los cálculos se introduce ahora un rango de temperatura con un extremo inferior " $T_{setmin}$ " y un extremo superior " $T_{setmax}$ ". El uso de calor se calcula como la energía necesaria para alcanzar y mantener la temperatura por lo menos en el extremo inferior mientras que el sobrecalentamiento del cultivo de algas por encima del extremo máximo se necesita de enfriamiento. El uso de calor sigue siendo opcional, como fue el caso del modelo de estanque abierto, mientras que la necesidad de enfriamiento no es opcional, ya que el sobrecalentamiento del cultivo de algas conduce a choques de cultivo.

1) Calentamiento del cuerpo de agua al amanecer. Esto supone que el cultivo se enfría por la noche a la temperatura mínima media ( $T_{min}$ ) y se calienta por la mañana hasta el extremo inferior del intervalo de temperatura ( $T_{setmin}$ ). El calor necesario para hacerlo se calcula multiplicando la diferencia de temperatura con la capacidad calorífica específica del agua ( $C_w$ ), el volumen de agua ( $V_w$ ) y el número de días por mes (Días).

$$H_{dawn} = (T_{setmin} - T_{min}) * C_w * V_w * DAYS \quad (17)$$

2) La radiación de calor (durante el uso de calor) se calcula multiplicando la diferencia de temperatura entre el cultivo de algas ( $T_{setmin}$ ) y la temperatura ambiente máxima ( $T_{max}$ ) con la velocidad de transferencia de calor del PBR ( $H_{pbr}$ ), el número de horas de calentamiento necesario y el número de días por mes (Días). La radiación de calor se pone a cero si la temperatura ambiental

está por encima de la temperatura de cultivo. Para evaluar el número de horas que se necesita calefacción, las horas de luz directa se restan de las horas de luz diurna basándose en la suposición de que no hay necesidad de calentamiento cuando hay luz solar directa en el PBR.

$$H_{rad} = (T_{setmin} - T_{max}) * H_{pbr} * (h_{day} - h_{sun}) * DAYS \quad (18)$$

La velocidad de transferencia de calor (MJ.h-1.K-1) se calcula como:

$$H_{pbr} = 10 * \frac{R_{volsur} * PBR_n * U_{size}}{0.5 * T_{diam}} * \frac{36000}{1000000} \quad (19)$$

Donde:

- $R_{volsur}$  es igual a la relación de volumen a superficie de los tubos de 0,045 m<sup>3</sup>m<sup>-2</sup>.
- $PBR_n$  es igual al número de unidades PBR.
- $U_{size}$  es igual a la cobertura de la superficie del suelo de una unidad PBR de 1.000 m<sup>2</sup>.
- $T_{diam}$  es igual al diámetro del tubo que es 0,06 m.
- La constante 10 es igual al coeficiente de transferencia de calor del material plástico (W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>).

El cálculo de la necesidad de enfriamiento supone una necesidad de enfriamiento siempre que la energía de la luz solar directa sea mayor que la pérdida de calor al ambiente en el extremo superior del rango de temperatura de consigna. La pérdida de calor se calcula multiplicando la diferencia de temperatura entre el cultivo de algas ( $T_{setmax}$ ) y la temperatura del ambiente ( $T_{max}$ ) con el coeficiente de transferencia de calor del PBR ( $H_{pbr}$ ). Esto se resta de la entrada de energía de la luz solar directa ( $H_{sun}$  en MJ por h y por unidad PBR), lo que resulta en la capacidad de enfriamiento requerida en MJ por hora si la luz solar directa entrante es mayor que la pérdida de calor por radiación. Por último, la capacidad de refrigeración necesaria al mes se calcula multiplicando el número de horas y días de sol con la capacidad de enfriamiento requerida.

$$H_{cooling} = ((RADi * PBRsurf * 0.01 - (T_{setmax} - T_{max}) * H_{pbr}) * H_{sun} * DAYS) * \frac{1}{100} \quad (20)$$

Donde:

$H_{cooling}$  es la capacidad de enfriamiento en GJ por mes,

$RADi$  = radiación global en  $J \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ ,

$PBRsurf$  = área ocupada por los PBRs en  $m^2$ ,

0.01 = un factor para convertir la multiplicación ( $RADi * PBRsurf$ ) A  $MJ \cdot h^{-1}$ ,

$T_{setmax}$  = temperatura máxima por encima de la cual se requiere enfriamiento.

**ANEXO D. Parámetros usados en el modelo de producción de Biomasa.**

**Tabla D 1. Parámetros usados para el modelo de fotobiorreactor flat panel.**

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
<b>FOTOBIORREACTOR FLAT PANEL</b>			
Espaciado entre placas	0.03	m	Enalgaе-Acrres
Relación volumen / superficie	0.06		
Altura del panel	1.54		
Anchura del área de la cerca	10		
Distancia entre cercas	0.77		
Superficie PBR(s)	1000	m <sup>2</sup>	
volumen total del PBR	60	m <sup>3</sup>	
Limpieza del reactor	4	por año	Enalgaе
Tiempo de inactividad de cultivo por Limpieza	7	días	
Tiempo de inactividad de producción por Limpieza	14		
Nº de Cercas / Ha (100 m de longitud)	12.987		Enalgaе
Factor de cultivo tiempo de inactividad	0.92		
Tiempo de inactividad de la producción del factor	0.84		
Intensidad de saturación <i>D.salina</i>		μmol/m <sup>2</sup> *s <sup>-1</sup>	Giannelli et al., 2015
Intensidad de saturación	250		

<i>H.pluvialis</i>			
Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)	0.4		(Orosz & Forney, 2008)
Eficiencia fotosintética bruta	0.27		
Absorción después de la reflexión	0.88		(Ben-Amotz 2008; Park et al., 2011)
Eficiencia fotosintética a la luz del día	0.05		Enalgae
Concentración de biomasa en el PBR	2.1	kg ds / m <sup>3</sup>	Enalgae
porcentaje de materia seca después de la cosecha	150		
Recuperación de biomasa de Algas	0.95	%	(Heasman et al., 2000)
Recuperación de medios después de la cosecha	90		
Eficiencia de recuperación de la biomasa centrifugación de la pila de disco	0.98		
Rendimiento de la recuperación de la biomasa en el molino	1.00		
Rendimiento de la recuperación de la biomasa en el secado	0.98		
Rendimiento de la recuperación de extracción	0.97		(Leach et al., 1998)
Consumo de energía para bombeo de aire	96	kWh/m <sup>3</sup> , mes	(Valderrama et al., 2003)
Consumo de energía para circulación	200		
Consumo de energía de calefacción /m <sup>3</sup>	0.73		
Energía para Cosecha	1.25	kWh/m <sup>3</sup>	<a href="http://www.evodos.eu/harv">http://www.evodos.eu/harv</a>

			esting-excellence/ Vertregt, N. & F.W.T. Penning de Vries, 1987. A rapid method for determining the efficiency of biosynthesis of plant biomass. J. Theor. Biol. 128:109-119.
Contenido energético de Algas			
Glucosa	15.63	kJ/g glucosa	
Parámetros de Cálculo para PVI			
Carbohidratos	1.211		
Proteínas	1.793		
Lignina	2.119		
Lípidos	3.03		
aniones orgánicos y cenizas	0.906		
Componentes valiosos de la composición de las algas			
microalga	<i>D.</i> <i>salina</i>		Becker, 2007: micro-algae as a source of protein
Carbohidratos	32		
Proteínas	57		
Lípidos	6		
aniones orgánicos y cenizas	5		
microalga	<i>H.</i> <i>pluvialis</i>		Becker, 2007: micro-algae as a source of protein
Carbohidratos	17		
Proteína	45		
Lípidos	25		
Restos	8		

aniones orgánicos y cenizas	5		
Composición del flujo de gas			
CO <sub>2</sub> %	0.07	%	
C%	0.02		
Carbón contenido en la materia seca	0.54	g/g	www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp
N contenido en la proteína	0.16	g/g de proteína	
P contenido en la materia seca	0.0027	g/g Biomasa Seca	
Eficiencia de consumo de CO <sub>2</sub>	50	%	
composición algal usado como entrada			
Concentración of N	25	g/m <sup>3</sup>	
Concentración of P	3.5714		
Concentración de Betacaroteno en biomasa	0.1	%	Ben-Amotz et al., 1982

**Tabla D 2. Parámetros usados para el modelo de estanque abierto.**

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
<b>ESTANQUE ABIERTO</b>			
Profundidad del agua	0.35	m	Enalgae
Superficie del PBR	1000	m <sup>2</sup>	
volumen del estanque	350	m <sup>3</sup>	
Intensidad de saturación <i>D.salina</i>			
Intensidad de saturación <i>H.pluvialis</i>	500	( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )	Giannelli et al., 2015

eficiencia fotosintética	0.015		Norsker, 2011 and Slegers, 2013
Absorción después de la reflexión	0.9	%	Ben-Amotz 2008; Park et al., 2011
Eficiencia fotosintética bruta	0.27		Orosz & Forney, 2008
Factor de nivel de rendimiento cuando no hay inyección de CO <sub>2</sub>	0.7		Estimación
Concentración de la biomasa	0.3		kg ds / m <sup>3</sup>
electricidad consumida por el bombeo de aire	7.3	kWh/m <sup>3</sup> , mes	Acres
Consumo de energía para la mezcla	3.65		
Consumo de energía para el calentamiento	0.73		
Energía consumida por la centrifuga	1.25	kWh/m <sup>3</sup>	
Agua recuperada después de la centrifuga	0.9	%	
eficiencia de consumo de CO <sub>2</sub>	0.5		Estimación
Composición de flujo de gas			
CO <sub>2</sub> %	0.07		Acres
C%	0.0190		
carbono contenido en la materia seca	0.54	g/g	<a href="http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp">www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp</a>
N contenido en la proteína	0.16	g/g de proteína	<a href="http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp">www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp</a>
P contenido en la materia seca	0.0027	g/g Biomasa Seca	<a href="http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp">www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp</a>

## ANEXO E. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FILTRO

Figura E 1. Cotización filtro por NP ingeniería de aguas parte 1.



NP INGENIERIA DE AGUAS

**Ing. Rafael José Villabona Nuncira**

**Consecutivo:** No. NP. 363 -17  
**Fecha** 17/07/17

---

**COTIZACIÓN**

Estimados Señores,

Adjunto se envía la cotización del sistema de tratamiento de agua para sistema de recirculación

<b>ANEXO No. 1</b>	BASE DE CALCULO
<b>ANEXO No. 2</b>	COMENTARIO TECNICOS
<b>ANEXO No. 3</b>	COSTO DE LOS EQUIPOS Y COMPROMISOS A ADQUIRIR

Cordialmente,



NP INGENIERIA DE AGUAS

**ING. CESAR A. NUNCIRA P.**  
Gerente general  
[npingenieriadeaguas@hotmail.com](mailto:npingenieriadeaguas@hotmail.com)

Calle 39 No. 10 – 61  
Teléfono: (2) 448 67 80 Fax: (2) 402 88 61  
E-mail: [npingenieriadeaguas@hotmail.com](mailto:npingenieriadeaguas@hotmail.com)  
[www.npingenieriadeaguas.com](http://www.npingenieriadeaguas.com)

**Figura E 2. Cotización filtro por NP ingeniería de aguas parte 2.**



#### BASE DE CÁLCULO

**Caudal: 80 M<sup>3</sup>/ día = 40 GPM**  
**Diámetro trabajo: 10 horas/ día**

#### COMENTARIOS TECNICOS

Para retirar estos contaminantes que tienen sólidos en suspensión; materia orgánica y minerales se recomienda:

- Instalar un preclorador para oxidar metales y materia orgánica
- Instalar un tren de filtración completo por arena grava y carbón activado para eliminar estos contaminantes del agua
- Se recomienda instalar un suavizador para retirar minerales



Calle 39 No. 10 – 61  
Teléfono: (2) 448 67 80 Fax: (2) 402 88 61  
E-mail: npingenieriadeaguas@hotmail.com  
www.npingenieriadeaguas.com

**Figura E 3. Cotización filtro por NP ingeniería de aguas parte 3.**



### PROPUESTA

#### **Incluye**

- Dos bombas de agua cruda trifásicas de 3 HP con sus componentes hidráulicos, eléctricos y de automatización
- Un equipo para preclorar el agua
- Un Clorador al final de la línea de filtración para mantener desinfectada el agua

#### **Un filtro de arena/grava de las siguientes especificaciones**

- Diámetro de 24 "
- Lamina de acero de 3/16"
- Pintura interna caucho clorado
- Pintura externa esmalte azul martillado
- Árbol de válvulas de PVC presión 1 1/2"
- Relleno: arena y grava

#### **Un filtro de arena/carbón de las siguientes especificaciones**

- Diámetro de 24 "
- Lamina de acero de 3/16"
- Pintura interna caucho clorado
- Pintura externa esmalte azul martillado
- Árbol de válvulas de PVC presión 1 1/2"
- Relleno: arena y carbón

#### **Un filtro de carbón activado de las siguientes especificaciones**

- Diámetro de 24 "
- Lamina de acero de 3/16"
- Pintura interna caucho clorado
- Pintura externa esmalte azul martillado

Calle 39 No. 10 – 61  
Teléfono: (2) 448 67 80 Fax: (2) 402 88 61  
E-mail: npingenieriadeaguas@hotmail.com  
www.npingenieriadeaguas.com

**Figura E 4. Cotización filtro por NP ingeniería de aguas parte 4.**



- Árbol de válvulas de PVC presión 1 1/2"
- Relleno: carbón

**Un suavizador de las siguientes especificaciones:**

- Diámetro de 24 "
- Lamina de acero de 3/16"
- Pintura interna epoxica blanca
- Pintura externa esmalte azul Martillado
- Árbol de válvulas de PVC presión 1 1/2"
- Relleno: grava y resina

Toda la tubería y accesorios requeridos para la instalación de la planta a punto cero en la loza de la planta.

Los números, letreros en acrílico y manual de operación de la planta.

Capacitación al personal encargado y arranque.

Mano de obra y transporte

Se entrega kits de análisis de agua.

**Precio total: 10'800.000 + IVA**

**CONDICIONES COMERCIALES**

**FORMA DE PAGO**

- |     |   |
|-----|---|
| 50% | anticipo (Se debe incluir el valor del <b>IVA TOTAL</b> ) |
| 30% | contra entrega de equipos                                 |
| 20% | Planta en funcionamiento y a satisfacción.                |

**VALIDEZ DE LA OFERTA**

El período de validez de la oferta es de 30 días.

Calle 39 No. 10 – 61  
Teléfono: (2) 448 67 80 Fax: (2) 402 88 61  
E-mail: npingenieriadeaguas@hotmail.com  
www.npingenieriadeaguas.com

**Figura E 5. Cotización filtro por NP ingeniería de aguas parte 5.**



#### **EJECUCIÓN**

Previa coordinación entre partes y se deberá notificar con diez (10) días de anticipación y una vez recibida la respectiva Orden de Compra por escrito.

El desplazamiento del personal y equipos se realizara una vez se apruebe por parte del propietario de la obra.

#### **RESPONSABILIDAD DEL CLIENTE**

- Coordinar los permisos de entrada del personal al sitio de trabajo.
- Facilitar la ejecución de las labores; en el horario convenido.

#### **APLAZAMIENTO DE LOS TRABAJOS**

En caso de que el cliente requiera aplazar o cancelar trabajos ya programados, deberá informar por escrito con dos (2) días de anticipación; de lo contrario cubrirá los gastos de mano de obra y desplazamiento en que incurra NP INGENIERIA DE AGUAS, por omitir el aviso oportuno.

**LOS CALCULOS Y DISEÑOS GENERADOS EN ESTA COTIZACION SON PROPIEDAD INTELECTUAL DE NP INGENIERIA DE AGUAS (ING. CESAR AUGUSTO NUNCIRA), POR LO QUE CUALQUIER USO O COPIA SIN AUTORIZACION DE ESTOS DOCUMENTOS TENDRA ACCIONES LEGALES.**



Calle 39 No. 10 – 61  
Teléfono: (2) 448 67 80 Fax: (2) 402 88 61  
E-mail: npingenieriadeaguas@hotmail.com  
www.npingenieriadeaguas.com

# ANEXO F. Especificaciones del equipo de extracción supercrítica con CO2.

Figura F 1. Especificaciones del equipo de extracción supercrítica con CO2.

## High Production Series 5000psi Dual-Phase Pumping System

Specification Sheet

### SYSTEM SPECIFICATIONS:

#### Extraction Vessel

- **Multiple vessel configurations available:** two 5 liter, two 20 liter, or two 40 liter vessels.
- **Volume:**
  - 5L vessel holds up to 3 pounds of dry, ground material
  - 20L vessel holds up to 12 pounds of dry, ground material
  - 40L vessel holds up to 24 pounds of dry, ground material
- NOTE: vessel does not need to be full in order to perform an extraction.
- **Pressure** – maximum pressure = 5000 psi (344 bar).
- **Temperature** – max 160F (71C)
- **Materials** – 304 stainless steel. Vessel interior is polished to food grade level.
- **Closures** – Threaded closure
- **Sealing mechanism** – self energized O-ring seals, Buna-90
- **Filter** – integral filters on closure heads. 20-micron standard, other sizes available.
- **Temperature measurement** – internal K type thermocouple senses actual extraction temperature
- **Jacket volume** – 5L vessel: 18 Liters (4.8 gallon), 20L vessel: 4.5 Liters (1.2 gallon)
- **Safety** – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

#### CO2 Pumping System

- **Flowrate** – up to 2.5L/min flow
- **Construction** –Electrically driven diaphragm compressor and Variable Frequency Drive controlled liquid pump
- **Materials** – all wetted parts are 316 stainless steel
- **Filter** – suction side of gas pump filtered to keep oil and contaminants from internal pump components
- **Safety** – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

#### Separators

- 2 separators on each unit.
- **Volume:** Separator 1 = 5L, Separator 2 = 2.5 Liters
- **Pressure** – Maximum pressure = 600 psi (41 bar).

- **Temperature** – up to 160F (71C)
- **Materials** – 304 stainless steel
- **Closures** – FDA sanitary style bolted
- **Sealing mechanism** – sanitary gasket, cured silicone
- **Safety** – non-isolable spring loaded safety relief valve prevents accidental over-pressurization

#### Separation Mechanism

- Valveless Expansion Technology (VET) –Separation occurs in 1st separator utilizing centrifugal separation and depressurization. Uses cold separation technology to preserve integrity of extracted oil

#### Heat Exchanger

- **Construction** – tube in tube style
- **Materials** – 304 stainless steel
- **Cooling/Heating media** – water

#### Chiller/Heater

- Two temperature zones using recirculating chiller/heater
- Temperature range: -10C to 50C (14F to 158F)

#### Dimensional Information

- [Click here for the 5000DP-5Lx5L footprint](#)
- [Click here for the 5000DP-5Lx20L footprint](#)
- [Click here for the 5000DP-20Lx20L footprint](#)
- [Click here for the 5000DP-40Lx40L footprint](#)

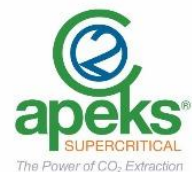
#### Control System

- **Functions** – Fully automatic Programmable Logic Controller (PLC) touch screen interface with first level safety functionality and user programmable pressure, temperature and time. Also has built in hour and maintenance timers, email messaging, data logging, and remote monitoring
- **Safety** – pressure transducers monitor system pressure and shut down system to prevent accidental over-pressurization

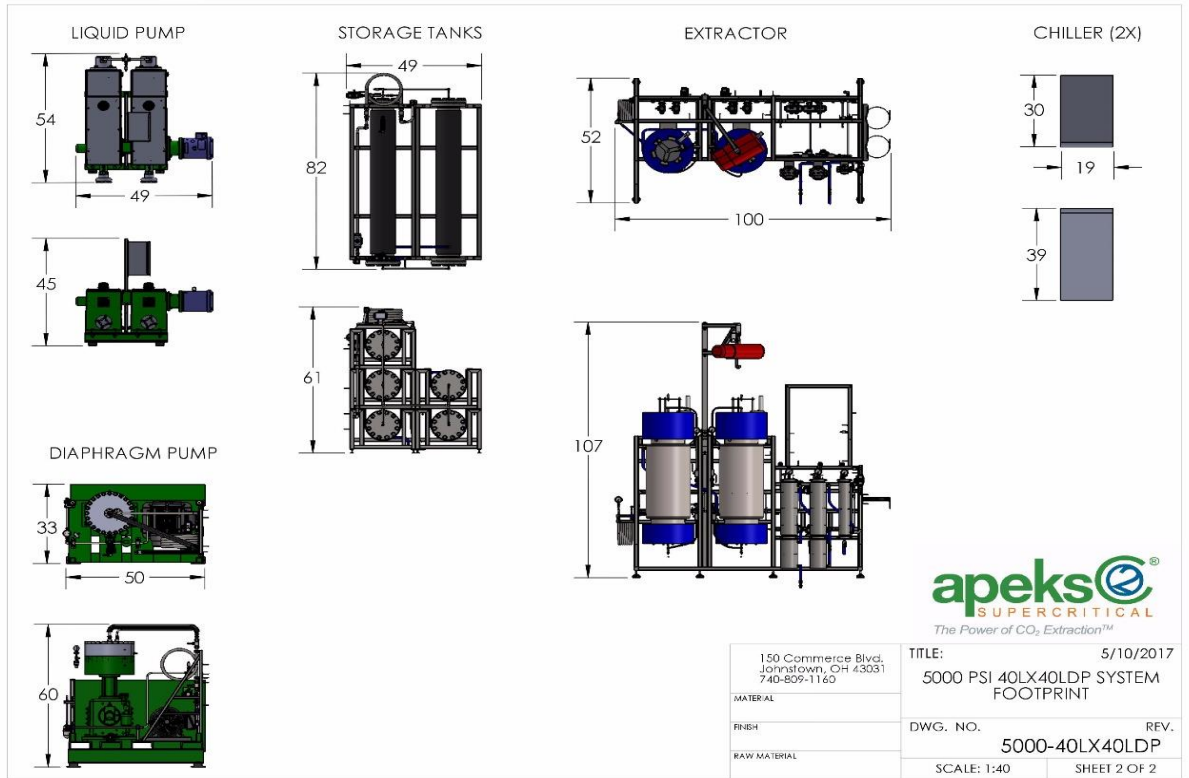


Made in the USA – Veteran Owned

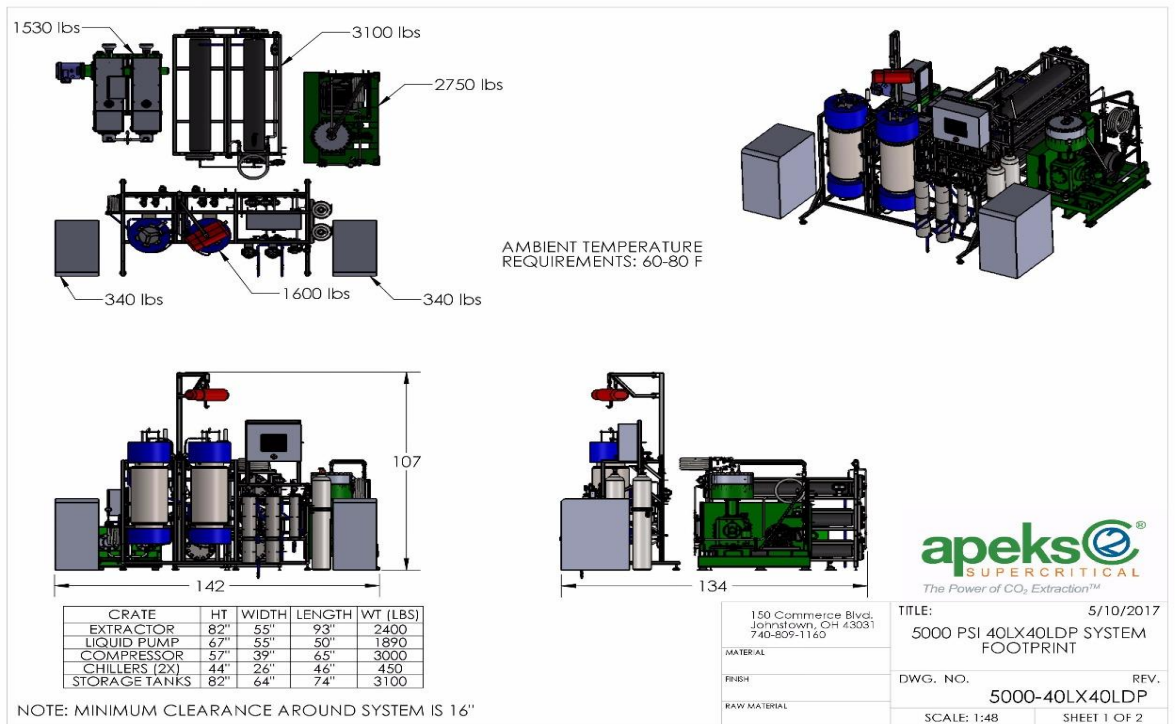
ApeksSupercritical.com 740-809-1160



**Figura F 2. Dimensiones del equipo de extracción supercrítica con CO2.**



**Figura F 3. Dimensiones de los equipos que componen la extracción supercrítica con CO2.**



## ANEXO G. Descripción del proceso de Carotenoides

### ***β-caroteno***

El proceso de producción de β-caroteno consta de 3 grandes etapas, cultivo, cosecha y extracción. El cultivo se encuentra constituido de una primera fase donde se encuentran, agua marina enriquecida (TK-101) por la corriente 6 y macronutrientes (TK-102) por la corriente 5. Seguido por el inoculador (R-101) donde este se encuentra el inóculo de la microalga que alimentada por TK-101, TK-102 y micronutrientes (TK-103) ayudando a crecer a esta y darle paso a los reactores de cultivo (R-201) por la corriente 4 cada vez que se empieza un nuevo cultivo; el crecimiento de la biomasa se lleva a cabo en los reactores tipo flat panel se demora 20 días el crecimiento de la biomasa, esta se pasa a la biosíntesis de carotenoide mediante la corriente 8 la cual comienza con los estanques abiertos (R-301), alimentados por un tanque (TK-201) con un medio hipersalino (4M) por la corriente 9 llega a R-301, donde se realiza el estrés de la microalga para que cambie su color; después pasa por la corriente 10 a la centrifuga (EC-401) donde se separa la biomasa del agua; una parte del agua se recupera por la corriente 13 al TK-201 y la otra pasa a un sistema de filtros (FIL-401) por la corriente 14, en los cuales se mejoran la calidad para el vertimiento (corriente 15). La biomasa sale por la corriente 11 con una humedad aproximada de 5% y pasa a un secador (D-501) en el cual se retira el exceso de agua para pasar a un tanque de almacenamiento (V-601) por la corriente 17 saliendo para la extracción supercrítica (T-601) por la corriente 19, la cual se realiza con CO<sub>2</sub> supercrítico corriente 21 bajo condiciones, T:60°C, P:26 MPa, flujo de CO<sub>2</sub>: 1 mL/min durante 2 horas; Este extracto pasara por la corriente 22 a un separador liquido-gas (S-601) donde el CO<sub>2</sub> volverá a reutilizarse y saldrá el β-caroteno por la corriente 24; esta extracción deja como residuo la biomasa (corriente 20) que también se comercializara. El producto final (β-caroteno) se venderá en diferentes concentraciones 10%, 15% y 20%.

## Astaxantina

El proceso de producción de Astaxantina consta de 3 grandes etapas, cultivo, cosecha y extracción. El cultivo se encuentra constituido de una primera fase donde se encuentran, el agua dulce (TK-101), micro nutrientes (TK-103) y macro nutrientes (TK-102) por las corrientes 6,4,5 respectivamente al reactor de crecimiento (R-201) y por las corrientes 1,3,2 respectivamente al inoculador (R-101) donde este se encuentra el inóculo de microalga ayudándola a crecer esta pasa por la corriente 7 la cual alimenta a R-201, cada vez que se empieza un nuevo cultivo; por último el crecimiento de la biomasa se lleva a cabo en los reactores tipo flat panel donde se demora 20 días el crecimiento de la biomasa, esta se pasa mediante la corriente 8 a la biosíntesis de astaxantina la cual comienza con los estanques abiertos (R-301) donde se aumenta la irradiación de 200 a 1.250  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para realizar el estrés de la microalga y así cambie su color; después pasa a la centrifuga(EC-401) mediante la corriente 12 donde se separa la biomasa del agua; el agua extraída pasa a un sistema de filtros(FIL-401) por la corriente 16, en los cuales se mejoran la calidad para una parte enviarla a vertimiento (corriente 19) y otra recircula al (R-301) por la corriente 18. La biomasa sale por la corriente 15 con una humedad aproximada de 5% y pasa a un secador (D-501) en el cual se retira el exceso de agua y pasa por la corriente 20 a un molino de bolas (BM-601) para realizar la disrupción celular para pasar a un tanque de almacenamiento (V-601) por la corriente 21 saliendo para la extracción supercrítica (T-701) por la corriente 22, la cual se realiza con  $\text{CO}_2$  supercrítico corriente 25 bajo condiciones, T:65°C, P:35 MPa, flujo de  $\text{CO}_2$ : 1 mL/min durante 2 horas; Este extracto pasara por la corriente 27 a un separador liquido-gas(S-701) donde el  $\text{CO}_2$  volverá a reutilizarse y saldrá el  $\beta$ -caroteno por la corriente 28; esta extracción deja como residuo la biomasa(corriente 26) que también se comercializara. El producto final (Astaxantina) se venderá en diferentes concentraciones 5%, 10% y 15.

## ANEXO H. Costos de los equipos para el cálculo del FCI.

**Tabla I 1. Costo de los equipos.**

Equipo	Valor [€]	Referencia
Reactor	460.150	
Tanque de almacenamiento	20.000	
Enfriador y calentador	218.959	
Desgasificador	179.148	
Control del proceso	159.243	Subitec [46]
Infraestructura fase 1	378.202	
Infraestructura fase 2	65.941	
Tanque de almacenamiento	10.000	
Secador	27.000	
Molino de Bolas	50.000	Alibaba [47]
Luces led	517.539	Philips [48]
Centrifuga	25.087	Evodos [49]
Filtro	3.850	NP Ingeniería de aguas [50]
Extracción supercrítica	267.000	Apeks supercritical [51]
<b>TOTAL</b>	<b>€</b>	<b>2.382.119</b>

# ANEXO I. Cotización de los reactivos involucrados en el medio Johnson J/1

## Figura I 1. Cotización de componentes del medio de cultivo. Parte 1.



NIT.800.053.310-8  
 CR TRONCAL DE OCCIDENTE KM 1 PAR EMPRESARIAL DE OCCIDENTE BG 18  
 PBX:2612013 Fax:4137848  
 www.artilab.com.co  
 E-mail: artilab@artilab.com.co  
 Funza Cundinamarca - Colombia



COTIZACION N. **33942**

<b>SEÑOR(ES):</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	<b>TELÉFONO:</b> 6344000 EXT. 2530
<b>CONTACTO:</b> JOHAN ANDRES MORALES CARVAJAL	<b>ASESOR:</b> CAROLINA CHARRY PLATA
<b>NIT/C.C.:</b> 890201213-4	<b>E-MAIL:</b> johan_an94@hotmail.com
<b>DIRECCIÓN:</b> KM 2 VIA AL REFUGIO GUATIGUARA - PIEDECUESTA	<b>COND. DE PAGO:</b> 30 Días
<b>CIUDAD:</b> BUCARAMANGA	<b>FECHA:</b> 04/05/2017 <b>VALIDO:</b> 04/06/2017

ITEM	CODIGO	DESCRIPCION DEL PRODUCTO	MARCA	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	TOTAL
1	131015.1211	ACIDO BORICO ACS PRESENTACION X KILO MARCA PANREAC	PANREAC	1	209,000.00	209,000.00
2	131134.1209	AMONIO MOLIBDATO (HEPTAMOLIBDATO) ACS PRESENTACION X 250 GRS MARCA MANREAC	PANREAC	1	569,000.00	569,000.00
3	1027901000	COBRE(II) SULFATO PENTAHIDRATO P.A. EMSURE® ACS.ISO.REAG. PH EUR EN PRESENTACIÓN 1 KG	MERCK	1	182,240.00	182,240.00
4	1025390250	COBALTO(II) CLORURO HEXAHIDRATO P.A. EMSURE® ACS.REAG. PH EUR EN PRESENTACIÓN 250 G	MERCK	1	1,935,280.00	1,935,280.00
5	1088831000	CINC SULFATO HEPTAHIDRATO P.A. EMSURE® ACS.ISO.REAG. PH EUR EN PRESENTACIÓN 1 KG	MERCK	1	126,480.00	126,480.00
6	1059271000	MANGANESO(II) CLORURO TETRAHIDRATO P.A. EMSURE® ACS EN PRESENTACIÓN 1 KG	MERCK	1	486,880.00	486,880.00
7	1084521000	ACIDO ETILENDIAMINOTETRAACETICO EN PRESENTACIÓN 1 KG	MERCK	1	599,760.00	599,760.00

\*Despachamos únicamente a ciudades principales de Colombia con fletes a nuestro cargo siempre que su pedido sea superior a \$400.000 incluido IVA.  
 \*Para pedidos inferiores a \$300.000 incluido IVA, por favor recogerlos en nuestras oficinas y su pago será de contado.  
 \*Si alguno de los productos aquí ofertados se agota al momento de recibir su orden de pedido, nos comunicaremos con usted para pactar un nuevo tiempo de entrega.  
 \*Monto mínimo de facturación \$100.000 incluido IVA.  
 \*Garantía: Los equipos tienen una garantía de 1 año por defecto de fabricación.

Nury Jannet Mejia Quintero

Elaboró y Revisó

## Figura I 2. Cotización de componentes del medio de cultivo. Parte 2.



NIT.800.053.310-8  
Carrera 57A No 5B-53  
PBX:2612013 Fax:4137848  
www.artilab.com.co  
E-mail: artilab@artilab.com.co



COTIZACION N. **33942**

ITEM	CODIGO	DESCRIPCION DEL PRODUCTO	MARCA	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	TOTAL
8	1039431000	HIERRO(III) CLORURO HEXAHIDRATO P.A. EMSURE® ACS, REAG. PH EUR EN PRESENTACIÓN 1 KG  ***POCAS UNIDADES AL MOMENTO DE COTIZAR**	MERCK	1	484,160.00	484,160.00
9	1048731000	POTASIO DIHIDROGENOFOSFATO P.A. EMSURE® ISO EN PRESENTACIÓN 1 KG	MERCK	1	140,760.00	140,760.00
10	1064041000	SODIO CLORURO CRISTAL P.A. FCO X 1 KG	MERCK	1	53,720.00	53,720.00
11	1058331000	MAGNESIO CLORURO HEXAHIDRATO P.A. EMSURE® ACS, ISO, REAG. PH EUR EN PRESENTACIÓN 1 KG  ENTREGA DE 30 DIAS CALENDARIO DEPENDIENDO DE LA DISPOSICION DEL PRODUCTO EN FABRICA	MERCK	1	270,640.00	270,640.00
12	1048361000	POTASIO CLORURO P.A. EMSURE® EN PRESENTACIÓN 1 KG	MERCK	1	102,000.00	102,000.00
13	1023821000	CALCIO CLORURO DIHIDRATO P.A. EMSURE® ACS, REAG. PH EUR EN PRESENTACIÓN 1 KG  ENTREGA DE 60 A 120 DIAS CALENDARIO DEPENDIENDO DE LA DISPOSICION DEL PRODUCTO EN FABRICA	MERCK	1	265,500.00	265,500.00
14	141524.1210	POTASIO NITRATO PRESENTACION X 500 GRS MARCA PANREAC	PANREAC	1	205,000.00	205,000.00
15	1063291000	SODIO HIDROGENOCARBONATO P.A. EMSURE® ACS, REAG PH EUR EN PRESENTACIÓN 1 KG	MERCK	1	83,640.00	83,640.00
16	1050991000	DI-POTASIO HIDROGENOFOSFATO TRIHIDRATO P.A. EMSURE® EN PRESENTACIÓN 1 KG  ENTREGA DE 60 A 120 DIAS CALENDARIO DEPENDIENDO DE LA DISPOSICION DEL PRODUCTO EN FABRICA	MERCK	1	376,040.00	376,040.00

- \*Despachamos únicamente a ciudades principales de Colombia con fletes a nuestro cargo siempre que su pedido sea superior a \$400.000 incluido IVA.
- \*Para pedidos inferiores a \$300.000 incluido IVA, por favor recogerlos en nuestras oficinas y su pago será de contado.
- \*Si alguno de los productos aquí ofertados se agota al momento de recibir su orden de pedido, nos comunicaremos con usted para pactar un nuevo tiempo de entrega.
- \*Monto mínimo de facturación \$100.000 incluido IVA
- \*Garantía: Los equipos tienen una garantía de 1 año por defecto de fabricación.

Nury Jannet Mejía Quintero

**Elaboró y Revisó**

### Figura I 3. Cotización de componentes del medio de cultivo. Parte 3.



NIT.800.053.310-8  
 Carrera 57A No 5B-53  
 PBX:2612013 Fax: 4137848  
 www.artilab.com.co  
 E-mail: artilab@artilab.com.co



**COTIZACION N. 33942**

**Comentarios:**  
 \*\*\*ENTREGA DE LOS PRODUCTOS DISPONIBLES DE 8 DIAS HABILES DESPUES DE RECIBIR SU ORDEN DE PEDIDO SALVO VENTA PREVIA\*\*\*

SUB - TOTAL	\$ 6,090,100.00
REDONDEO	\$ -0.20
VALOR ANTES DE IVA	\$ 6,090,099.80
IVA	\$ 1,127,532.20
<b>VALOR TOTAL</b>	<b>\$ 7,217,632.00</b>

\*Despachamos únicamente a ciudades principales de Colombia con fletes a nuestro cargo siempre que su pedido sea superior a \$400.000 incluido IVA.  
 \*Para pedidos inferiores a \$300.000 incluido IVA, por favor recogerlos en nuestras oficinas y su pago será de contado.  
 \*Si alguno de los productos aquí ofertados se agota al momento de recibir su orden de pedido, nos comunicaremos con usted para pactar un nuevo tiempo de entrega.  
 \*Monto mínimo de facturación \$100.000 incluido IVA  
 \*Garantía: Los equipos tienen una garantía de 1 año por defecto de fabricación.

Nury Jannet Mejia Quintero  
**Elaboró y Revisó**