

Economía de recursos naturales a partir de la producción de *Spirulina* (*Arthrospira maxima*) en fotobiorreactores, La Guajira, Colombia

Economics of Natural Resources from the Production of *Spirulina* (*Arthrospira maxima*) in Photobioreactors, La Guajira, Colombia

Recibido: 25-05-2017

Aceptado: 05-09-2017

MARIO A. COLORADO GÓMEZ¹
DIEGO A. MORENO TIRADO²

Resumen

Las cianobacterias *Arthrospira maxima* o *Spirulina maxima*, también conocida como microalgas verdeazules, son catalogadas como el alimento universal, dependen de la actividad solar para su desarrollo y como las plantas captan CO₂ y aportan O₂ a la atmósfera. El 70% de su peso es proteína y el restante es fibra y otros oligoelementos. Desde hace un par de décadas se producen en ambientes tipo estanques abiertos y en sistemas cerrados de biorreactores para el aprovechamiento de la luz solar. Grandes centros de producción en países desarrollados comercializan la *Spirulina* como simples nutrientes de alto valor económico.

Las Naciones Unidas promueven el consumo de la *Spirulina* para combatir la desnutrición infantil en países subdesarrollados. Este estudio demuestra los procedimientos técnicos y tecnológicos para la producción de *Spirulina* en sistemas cerrados y su viabilidad de producción en zonas áridas y de considerable pobreza como La Guajira colombiana.

Este artículo presenta una parte de los resultados del proyecto de investigación “Producción de alimento natural con base en Astaxantina y Espirulina a partir de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación de las microalgas *Haematococcus pluvialis* y *Spirulina sp.*, en el departamento de La Guajira”.

1 Colombiano. Biólogo Marino. Magíster en Administración de Negocios. Investigador principal del proyecto. mariocol@misena.edu.co

2 Colombiano. M.Sc. Gerencia Ambiental. Coordinador de proyecto. Director de la Fundación Terrazul, La Guajira, Colombia. diegomoreno@terrazul.org

Palabras clave: producción de *Spirulina*, ventajas ambientales, Fotobiorreactores, transferencia, alimento, La Guajira.

Abstract

Cyanobacteria like *Arthrospira maxima* or *Spirulina maxima*, also called bluegreen microalgae are recognized as universal food, these microorganisms depend on sunlight for their development and similarly to vascular plants they capture CO₂ and release O₂ to the atmosphere. 70% of its weight is made out of protein and the remaining is composed of fiber and other oligoelements. A couple of decades ago bluegreen microalgae have been produced in open pond systems and in enclosed photobioreactor systems for sunlight efficiency. Large production at *Spirulina* farms in developed countries commercialize these microalgae for nutraceuticals directed to the consumer market.

Nonetheless, the United Nations Organization promotes the consumption of *Spirulina* to combat malnutrition of undernourished children in developing countries. This study shows technical and technological procedures towards the production of *Spirulina* in enclosed systems and provides insights as to their suitability in harsh arid environments with presence of extreme poverty conditions.

This article presents a part of the results of the research project "Production of natural food based on Astaxanthin and Spirulina from the research, technological development and innovation of the microalgae *Haematococcus pluvialis* and *Spirulina sp.*, in the department of La Guajira".

Keywords: *Spirulina* Production, Environmental Advantages, Photobiorreactors, Transfer, Food, La Guajira.

INTRODUCCIÓN

El alga verdeazul *Spirulina* (*Arthrospira máxima* o *Spirulina maxima*) tiene un inusual alto contenido de proteína y una gama de abundantes nutraceuticos y en los años ochenta deslumbró al mundo como un suceso

comercial al ser cultivada en grandes estanques tipo raceway (Voushak & Richmond, 1988). Ahora bien, a nivel mundial, China se ha convertido en el mayor productor mundial, y por ejemplo en el año 2006 alcanzó las 2.500 toneladas peso seco (Hu, 2007).

Estas cianobacterias son termofílicas con un óptimo crecimiento en un rango de temperatura entre los 35 a 38°C (Li y Qi, 1977 & Belay, 1997). Sin embargo se encuentran bastantes reportes que exponen la posibilidad del cultivo industrial de *Spirulina* en climas templados (Jiménez, 2003). El departamento de La Guajira presenta una temperatura media de 28 °C, el mes de julio se alcanza el promedio más alto con 30 °C y en enero el promedio más bajo con 26 °C y un promedio anual de brillo solar de 2706 horas de sol (Paz et al., 2002), temperatura del agua para estanques de cultivo entre 24 y 29 °C (Colorado, 2005).

En consecuencia, el departamento de La Guajira presenta varias ventajas de índole ambiental para el desarrollo industrial de *Spirulina*, este manuscrito tiene como objetivo analizar la producción de *Arthrospira maxima* en Fotobiorreactores en los siguientes aspectos: 1) las fases de escalamiento, 2) la obtención de biomasa (materia prima) y, 3) el beneficio social y ambiental que esta producción representa.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en el municipio de Riohacha en la zona media de la Península de La Guajira, Colombia. La etapa 1 de la investigación se localizó en la Cámara de Cultivo Indoor de la Fundación Terrazul Centro de Desarrollo Tecnológico (Fundación Terrazul) zona urbana en las coordenadas geográficas 11°33'03.89"N y 72°54'24.93"W, mientras la etapa 2 de la investigación se ubicó en la Unidad Acuicola del Centro Agroempresarial y Acuicola del Sena regional Guajira en las coordenadas 11°31'03.28"N y 72°52'07.71"W. La Media y Alta Guajira es un territorio con bosques secos tropicales y suelos que van desde semiáridos a muy áridos con vegetación xerofítica que registra una precipitación media anual de 250 mm, considerada la más baja del país. Temperatura media de 28°C, el mes de julio se alcanza el promedio más

alto con 30 °C y en enero el promedio más bajo con 26 °C y finalmente un promedio multianual de brillo solar de 8-9 horas al día (IDEAM, 2013).

METODOLOGÍA

Las etapas metodológicas de la investigación son consecuentes con los diseños experimentales y escalamientos industriales reportados en la literatura y de experiencias publicadas propias del sector de la producción de microalgas con fines similares a los del presente estudio. Se utilizará el término de *Spirulina* o *Arthrospira* de manera ambivalente en el presente estudio.

Condiciones en cámara de cultivo bajo techo

Para todos los cultivos indoor (Figura 2) se proporcionaron los siguientes parámetros: i) iluminación, se suministró por lámparas fluorescentes laterales a una intensidad luminosa de 58 $\mu\text{mol quanta}/\text{m}^2\cdot\text{s}$; ii) medio de cultivo Zarrouck (modificado), con un fotoperiodo de 16:8 h, aireación constante, temperatura $28 \pm 2^\circ\text{C}$ y a pH inicial de 9.0.

Condiciones de cultivo outdoor

Los cultivos outdoor se mantuvieron expuestos a las condiciones ambientales como exposición a la irradia-

ción solar, viento y precipitaciones, el medio de cultivo utilizado fue Zarrouck (modificado), con un fotoperiodo de 12:12, aireación constante, temperatura ambiental que varió entre los $33 \pm 5^\circ\text{C}$ y a pH inicial de 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento poblacional

Monitoreo de la población de *Arthrospira maxima*

El crecimiento de *Arthrospira maxima* se determinó por densidad óptica O.D. a 680 nm utilizando un espectrofotómetro HACH DR 2700 (Duerr, 1997).

Cultivo de *Arthrospira maxima*

Escalamiento

Se sembró un inóculo de 0,05 ml de *Spirulina maxima* proveniente de la cepa mantenida en el cepario de la Fundación Terrazul (Figura 3), en tubos de ensayo de 20 ml con 10 ml de medio de cultivo, con fotoperiodo 12:12, temperatura de cultivo $22 \pm 2^\circ\text{C}$, pH de 9.0 y salinidad 4 ‰ (Figura 4).



Figuras 1 y 2. Sistema de cultivo de *Spirulina maxima*.

Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

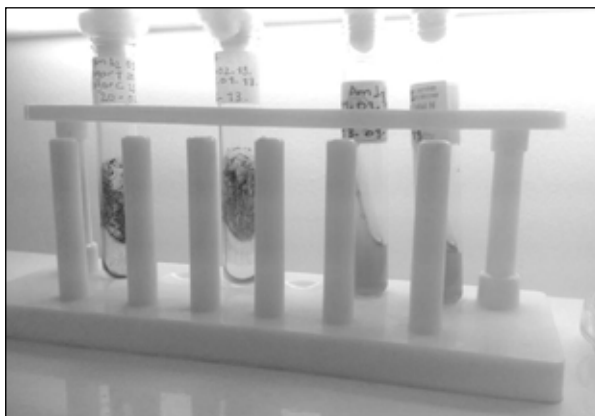


Figura 3. Cepas de *Arthrospira máxima* en medio sólido.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.



Figura 5. Inóculo de 100 ml en fase exponencial de *Arthrospira máxima* con una densidad óptica 0.9 O.D. 680.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

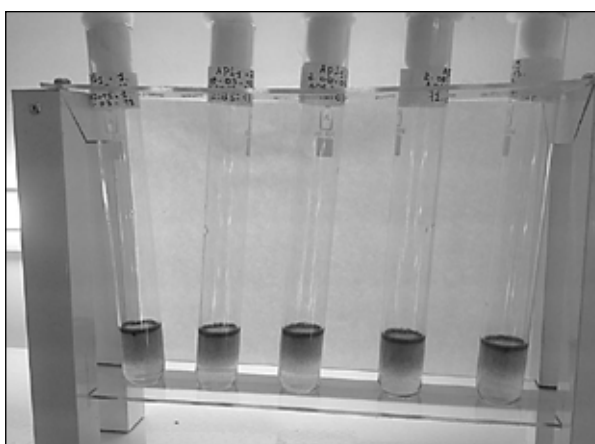


Figura 4. Inóculo de 10 ml en fase exponencial de *Arthrospira máxima* con una densidad óptica 0.6 O.D. 680.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.



Figura 6. Cultivo de *Arthrospira maxima* en 250 ml de capacidad (Vista en aumento de 10 x).
Fuente: Cámara de cultivo, Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Es importante resaltar que debido al mantenimiento de la cepa de *Arthrospira maxima* por largos periodos de cultivo sin el aporte directo de luz solar, las células se adquieren una forma alargada contraria a la disposición helicoidal (Figura 6).

Cultivo de inóculos hasta 100 ml

Se inoculó 10 ml de muestra proveniente de los inóculos de tubo de ensayo que previamente se habían cultivado, en 3 matraces Erlenmeyer de vidrio de 250 ml de capacidad y con 200 ml de medio de cultivo, además de aireación constante. El crecimiento duró un periodo de 12 días, la temperatura de cultivo osciló entre los 30 a 32 °C, el pH se mantuvo en promedio en 10 y salinidad 4‰.



Figura 7. Cultivo de *Arthrospira maxima* en 250 ml de capacidad (Vista en aumento de 40 x).
Fuente: Cámara de cultivo, Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Cultivo de microalgas hasta 1 lt

Del cultivo en los Erlenmeyer de 250 ml se extrajo un inóculo de 100 ml y se sembró en Fotobiorreactores con 1,0 litro de medio de cultivo. Los cultivos de *Arthrospira maxima* fueron mantenidos en condiciones controladas de temperatura ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) con una duración del cultivo fue 15 días.

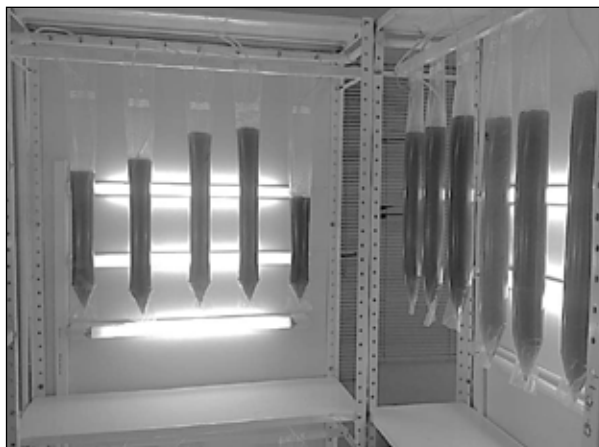


Figura 8. Cultivo de *Arthrospira maxima* en Fotobiorreactores de 1 litro de capacidad.

Fuente: Cámara de cultivo, Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Cultivo de *Arthrospira maxima* en fotobiorreactor de 50 lt

Condiciones de cultivo Fotobiorreactores

Del cultivo en Fotobiorreactores de 1 litro de capacidad se extrajeron 10 inóculos de 10 litro para depositarlos en cada módulo del fotobiorreactor. Se sembró el inóculo de 10 litros en un volumen de 20 litros de agua previamente fertilizada con medio de cultivo.



Figura 9. Cultivo de *Arthrospira maxima* en módulo de fotobiorreactores con capacidad 150 galones.

Fuente: Cámara de cultivo, Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Así pues, los experimentos se iniciaron con un inóculo de 0,3 O.D. 680 en fase exponencial en cada módulo del fotobiorreactor. Los cultivos se mantuvieron expuestos a la irradiación solar, al viento y a la lluvia, la temperatura del agua estuvo en un rango de entre 31 a 36°C y un pH de entre 9,0 y 10,0.

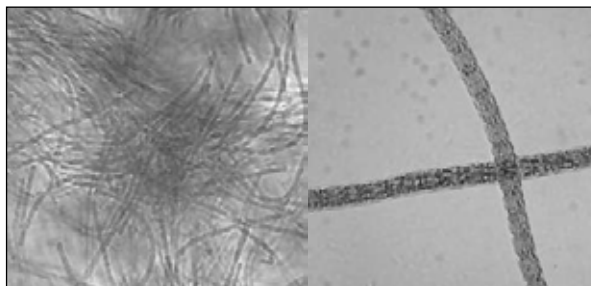


Figura 10. *Arthrospira maxima* vista en microscopio en aumento de 10x y 40x.

Ahora bien, en el momento que el cultivo presenta una Densidad Óptica de 0,9, se procedió a realizar el aforo del cultivo hasta los 50 litros (Figura 11).



Figura 11. Cultivo de *Arthrospira maxima* en fotobiorreactor con capacidad 50 litros.

Fuente: Cámara de cultivo, Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Obtención de biomasa seca

Posterior al proceso de crecimiento, cuando la Densidad Óptica de la muestra alcanza entre 0.9 a 1.3, se procedió a la cosecha de *Arthrospira maxima* el contenido de cada fotobiorreactor es extraído y filtrado sobre un tamiz de 20 micrones (Figuras 12 y 13). Se tuvo cuidado en realizar el proceso de cosecha paulatinamente y evitando generar demasiada presión sobre la biomasa, ya que los filamentos de *A. maxima* son delicados y pueden fragmentarse.



Figura 12. Filtración de biomasa de *Arthrospira maxima* por medio de malla de 20 micrones.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.



Figura 13. Filtración de biomasa de *Arthrospira maxima* mediante malla de 20 micrones.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Las algas cosechadas se acidifican ligeramente (ácido sulfúrico al 3%) y se disponen en capas de 1 a 3 mm de espesor sobre bandejas para ser deshidratadas en secador solar (Figura 14) (Ciferri, 1983). El proceso de deshidratación (hasta un contenido húmedo menor al 15%) se puede cumplir ya sea al sol o en un horno regulado a 40 °C.

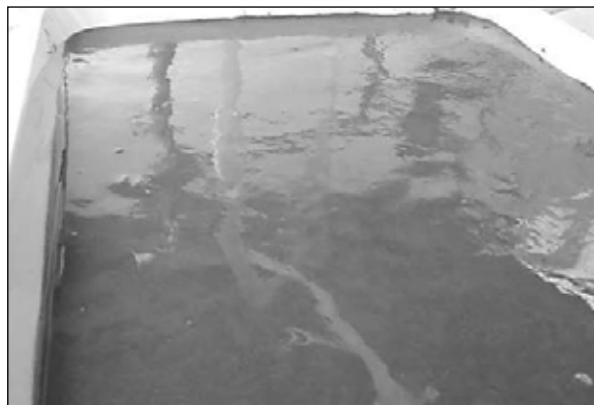


Figura 14. Biomasa de *Arthrospira maxima* dispuesta en bandejas plásticas.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Las escamas deshidratadas obtenidas son molidas hasta fino polvo (Figura 15). El producto resultante se almacena en frascos de plástico oscuro en un lugar fresco y seco para su evaluación bromatológica (Figuras 16 y 17). Se obtuvo en promedio una relación de 1,2 gramos de biomasa seca de *Arthrospira maxima* por cada litro de cultivo de 8 días de cultivo en fotobiorreactores de 50 litros.



Figura 15. Biomasa de *Arthrospira maxima* macerada.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.



Figura 16. Envasado de biomasa de *Arthrospira maxima*.
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.



Figura 17. Producto envasado de biomasa seca de *Arthrospira maxima* (Spirulina) en frasco plástico oscuro
Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

Finalmente, al producto se le realizó un análisis bromatológico básico en el cual se obtuvo los valores porcentuales de Humedad, Proteína, Fibra cruda, Grasa Total, Carbohidratos, Cenizas y Calorías (Tabla 1). Los resultados muestran bajos contenidos de grasa total y carbohidratos propios de este tipo de producto utilizado como ingrediente en la elaboración de suplementos dietéticos. Así mismo, el contenido de proteína es alto en comparación con otras fuentes de proteínas como la carne proveniente del pollo o del ganado vacuno, este valor se acerca al generalmente reportado para *Arthrospira máxima*, valores de entre 60 al 70%.

Tabla 1. Análisis bromatológico básico realizado al producto Spirulina obtenido en la cultivo de *Arthrospira maxima*.

Ensayo	Técnica	Cantidad
Humedad (g/100g)	Secado por estufa	11,5
Proteína (g/100g)	Kjeldahl	50,1
Fibra Cruda (g/100g)	Hidrólisis ácida, alcalina y calcinación	16,9
Grasa Total (g/100g)	Extracto etéreo	2,5
Carbohidratos (g/100g)	Cálculo por diferencia	14,6
Cenizas (g/100g)	Calcinación	2,4
Calorías (Kcal/100g)	Determinación indirecta, factor de atwater	209,3

Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2013.

LAS VENTAJAS, DESVENTAJAS Y ESTRATEGIAS

El cultivo de *Arthrospira* en el departamento de La Guajira, fundamenta sus ventajas competitivas en el aspecto ambiental como clima semiárido, valores de temperatura altos y constantes durante todo el año, bajos índices de precipitación media anual.

La anterior afirmación se basa en la comparación con los grandes centros de producción en países del primer mundo, como por ejemplo Imperial Valley (California, EE. UU.), donde las granjas de *Arthrospira* deben detener la producción entre 4 a 5 meses al año (octubre a marzo) debido a los problemas de estrés (baja productividad, contaminación, etc.) suscitados por las bajas temperaturas que se presentan en la latitud más al sur del desierto californiano de los Estados Unidos de América (Latitud 32°) (Oilgae, 2009).

Lo mismo sucede en centros de producción ubicados en latitudes subtropicales del resto del mundo los cuales deben resolver grandes brechas tecnológicas por causa de las temporadas de invierno; entre tanto La Guajira colombiana se ubica en una franja geográfica sobre los 11° Norte, observando a sí mismo que comparte similitudes bióticas y abióticas con países del África central, el sur de la India y el sureste asiático.

tico. Entre los países del sureste asiático se destaca Malasia como uno de los países que recientemente ha comenzado producción a gran escala de microalgas con fines alimentarios.

La utilización de sistemas cerrados como los Fotobiorreactores permite el control del cultivo donde se evita la contaminación por otros microorganismos a diferencia de sistemas abiertos tipo *raceway* o estanques carrusel, los cuales quedan expuestos al viento, las lluvias y la colonización por organismos rastreos o aéreos.

Este sistema de cultivo profiere la optimización de los espacios y la reutilización del agua utilizada en el cultivo, lo cual supone una reducción en el consumo del recurso hídrico y evita la utilización de grandes extensiones de tierra. Para el estudio actual se logró la obtención 48 kilos de biomasa semanal en un área de 100 m².

De manera que una ecuación simple permite proyectar una producción de 4.800 kilos semanales de biomasa seca de *Arthrospira maxima* en 10.000 m² de área cultivo, es decir 1 ha para un total de 96.000 Fotobiorreactores de 50 litros de capacidad; no obstante doblando la capacidad de los biorreactores, es decir aprovechando la expansión vertical se podrían implementar biorreactores de 100 litros de capacidad c/u, lo que permitiría una producción de 9.600 kilos semanales de biomasa seca de *Spirulina* en 1 Ha de superficie.

BENEFICIO SOCIAL Y AMBIENTAL

En cuanto a la promoción del cultivo de la *Spirulina*, este se ha adoptado como instrumento de política internacional por el Instituto Intergubernamental para el Uso de *Spirulina* en la Lucha Contra la Desnutrición (IIMSAM por sus siglas en inglés) en asocio con las Naciones Unidas para combatir la desnutrición mediante el fortalecimiento comunitario para la producción artesanal y consumo local de este recurso hidrobiológico (IIMSAM, 2013). Precisamente un punto a favor refiere que tan solo 5 gramos de *Spirulina* diaria es suficiente cantidad para tratar a un

infante en estado de malnutrición regresándole a su estado nutricional óptimo en tan solo 3 meses de tratamiento continuo.

Cabe resaltar que en La Guajira se concentra una de la mayor población afectada por la desnutrición, alta morbilidad y mortalidad infantil en Colombia (DANE, 2005). Con respecto al desarrollo de una nueva cadena productiva en La Guajira sustentada en la producción de alimento a partir de *Arthrospira*, se debe sustentar con alianzas entre las unidades productivas lideradas en lo posible por mujeres Wayuu y mujeres afrodescendientes, con la sociedad civil fortaleciendo la gestión empresarial que promuevan la ingestión de nutrimentos esenciales de bajo costo y a su vez generen oportunidades de empleo en mujeres y madres cabeza de familia.

En consecuencia se podrá obtener la producción de alimento esencial para garantizar la nutrición de los beneficiarios finales es decir, niños, niñas, mujeres gestantes y madres lactantes. Lo anterior será el resultado de una acción precedente desde la innovación y el desarrollo tecnológico como iniciativa de la sociedad civil previamente diseñada, no solo con miras a reducir la pobreza en minorías étnicas marginadas del territorio guajiro, sino también con la finalidad de contribuir con la lucha contra la desertificación mediante la promoción de actividades productivas en suelos áridos no aptos para el desarrollo de la agricultura tradicional.

Esta acción contiene un valor ambiental adicional y es la producción limpia y amigable al medio ambiente a través del cultivo de especies de cianobacterias que capturan Dióxido de Carbono (CO²) y reducen el efecto invernadero, cuyas unidades productivas sean operados en lo posible eficientemente utilizando energía fotovoltaica (luz solar).

Otro valor que añade la actividad de cultivo de cianobacterias, es la puesta en práctica de la equidad de género sin que se afecten los usos, costumbres e idiosincrasia, puesto que las unidades productivas y artesanales pueden ser administradas y gestionadas por mujeres cabeza de familia, y estas a la vez participen activamente en la generación de ingresos y alimento sano y seguro para promover el bienestar

social y familiar de cada comunidad beneficiaria que les asegure el alimento y a la vez genera ingresos para fortalecer la unidad y economía familiar.

CONCLUSIONES

El cultivo indoor realizado en la cámara de cultivo de la Fundación Terrazul arrojó resultados positivos y esperados, ya que se escalaron los cultivos hasta generar inóculos de 1 litro y densidades ópticas de 0.9 para *Arthrospira maxima*, lo cual permitió continuar el escalamiento *outdoor* en módulos de Fotobiorreactores en los cuales se alcanzó la producción a escala masiva de biomasa para A. máxima y una producción de más de 1 gramo por litro de biomasa seca.

Por otra parte, se establecido y estandarizado el mecanismo de cultivo manteniendo la producción de lotes con su respectiva trazabilidad, lo cual permite avanzar en la generación de los paquetes tecnológicos para la producción de alimento a partir de esta cianobacteria.

Finalmente, se ha obtenido una fuente de alimento con atributos que permite proyectar una transferencia a la sociedad con el desarrollo agroindustrial alrededor del cultivo de *Arthrospira* con sostenibilidad ambiental, social y económico que permite la inclusión de las minorías étnicas y poblaciones rurales sin distinción de género.

Agradecimientos

Al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, al SENA Regional Guajira y su Centro Agroempresarial y Acuicola por el apoyo brindado, y en especial al Programa de Innovación y Desarrollo Tecnológico Productivo del SENA, el cual tiene como objetivo contribuir al desarrollo tecnológico y a la implantación de procesos innovadores en el sector productivo nacional mediante la financiación a proyectos de empresas productoras de bienes y/o servicios cuyo propósito y fin es elevar sus niveles de productividad y competitividad. A las tecnólogas en Acuicultura Adrianis Caraballo Sierra y Nohelis Zuleta Viana por su dedicación y esfuerzo y en fin a todo el equipo de la Fundación Terrazul por su entrega incondicional en la obtención de estos resultados.

REFERENCIAS

- Belay, A. (1997). "Mass culture of *Spirulina* outdoors-the Earthrise Farms experience". In: *Vonhask A (ed) Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology*. Taylor & Francis, London, UK, pp. 131-158.
- Colorado, M., Sanín, P. & Suárez, C. (2005). *El desarrollo de la camaronicultura en zonas indígenas en el departamento de La Guajira*. CENIACUA - CIAT - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. Bogotá D.C. Colombia, pp. 50.
- DANE. (2005). *Censo General 2005*. Tomado de: <http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/censos>
- Hu, H. (2007). "Prospects on large-scale cultivation of *Arthrospira (Spirulina)* by using alkaline lakes in China". In *New frontiers of phycology-Proceedings on the 312nd Xiangshan Science Conference*, Nov. 7-9th, Beijing, China, pp. 21.
- IDEAM. (2013). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Centro de Documentación e Información Científico Técnica República de Colombia. Consultado el 20 de noviembre de 2013 en: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/publicaciones/publicaciones2.html>
- IIMSAM. (2013). IIMSAM Intergovernmental Observer to the United Nations Economic and Social Council. Consultado el 28 de noviembre de 2013 en: <http://iimsam.org/>
- Jiménez, C., Cossío, B. R., Labella, D. & Niell, F. X. (2003). *The feasibility of industrial production of Spirulina (Arthrospira) in Southern Spain*. *Aquaculture* 217:179-190.
- Li, D. M., & Qi, Y. Z. (1997). *Spirulina industry in China: present status and future prospects*. *J Appl Phycol* 9:25.28.
- OILGAE. (2009). *Comprehensive Oilgae Report: Energy from Algae: Products, Market, Processes & Strategies* (Informe general realizado por Oilgae: Energía de las algas: productos, mercado, procesos y estrategias). Septiembre 2009, páginas 37-38. Consultado el 15 de noviembre de 2013 en: <http://www.oligae.com>

- Paz, F., Colorado, M., Sanín, P. & Violet, O. (2002). *Estudio de prefactibilidad de la camaricultura colombiana en el departamento de La Guajira*. CENIACUA. Bogotá D.C. pp. 283.
- Voushak, A., Richmond, A. (1988). *Mass production of blue-green alga Spirulina: an overview*. Biomass 15:233-247.