

Desarrollo, producción y beneficio ambiental de la producción de microalgas. La experiencia en La Guajira, Colombia*

Development, Production and Environmental Benefits of Microalgae Production. The Case of La Guajira, Colombia.

Développement, production et avantage environnemental de la production de micro-algues. L'expérience à La Guajira, Colombie

Mario A. Colorado Gómez**, Diego A. Moreno Tirado***, Jéssica L. Pérez Posada****

Recibido: 2012-12-12 // Aceptado: 2012-12-14 // Evaluado: 2013-01-20 // Publicado: 2013-06-30

Cómo citar este artículo: Colorado Gómez, M. A., Moreno Tirado, D. A., y Pérez Posada, J. L. (2013). Desarrollo, producción y beneficio ambiental de la producción de microalgas. La experiencia en La Guajira, Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 17(32), 113-126.

Código SICI: 0121-7607(201301)17:32<113:DPBAPM>2.0.TX;2-C

Resumen

Las microalgas son fuentes de biomoléculas y metabolitos de importancia económica y constituyen una fuente directa de alimento, medicamentos y biocombustible, entre otras aplicaciones. El territorio de La Guajira (Colombia) presenta condiciones propicias para el desarrollo y producción de microalgas a nivel industrial. Particularmente se resalta el interés en dirección de la producción de ácidos grasos esenciales para la salud humana, así como en la investigación sobre la obtención de aceites para la creciente industria de los biocombustibles de tercera generación. Este trabajo buscó por un lado, avanzar en el desarrollo de subproductos de origen microalgal a escala industrial en Colombia utilizando sistemas de cultivos cerrados que no compiten con la producción de alimento humano sobre suelos de uso agrícola y por otro lado, destacar el beneficio ambiental que esta producción representa.

Palabras clave: sistema de producción, microalgas, *Chlorella* sp., beneficio ambiental, La Guajira, Colombia.

Palabras clave descriptores: Microalgas-crecimiento y desarrollo, Microalgas-aspectos ambientales. Microalgas--Cultivos y medios de cultivo-La Guajira (Colombia).

* Este artículo presenta parte de los resultados del proyecto de investigación "Desarrollo biotecnológico para la producción de aceites vegetales a partir del cultivo de microalgas con fines industriales en el departamento de La Guajira" aprobado por la Convocatoria 021 de 2011 de Innovación y Desarrollo Tecnológico (IDT) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), bajo la modalidad de cofinanciación por el SENA y la Fundación Terrazul Centro de Desarrollo Tecnológico, Convenio 0327 de 2011.

** Biólogo Marino. Máster en Administración de Negocios. Investigador principal del proyecto 1. Email: mariocol@misena.edu.co

*** MSc en Gerencia Ambiental. Coordinador de proyecto 1. Director de la Fundación Terrazul, Calle 5 No. 5-07, Riohacha, La Guajira, Colombia. Email: diegomoreno@terrazul.org

**** Profesional en Acuicultura. Coordinadora de Cámara de Cultivo Indoor de la Fundación Terrazul. Email: jperez@terrazul.org

Abstract

Microalgae are an economically important source of biomolecules and metabolites and constitute a direct source of nourishment, medicine and biofuels, among others. The Guajira (Colombia) territory presents apt conditions for the development and production of microalgae at an industrial level. Of particular interest to it would be the extraction of fatty acids essential to human health, as well as the research on the extraction of oils for the growing third-generation biofuels industry. This paper intends, on the one hand, to further study the development of sub-products of microalgae at an industrial scale in Colombia using closed farming systems which will not compete with the production of human food on land intended for agriculture, and on the other, to highlight the environmental benefits such production would yield.

Key words: Production System, Microalgae, *Chlorella* sp., Environmental Benefit, La Guajira, Colombia.

Key words plus: Microalgae-growth and development, Microalgae-environmental aspects, Microalgae - Cultures and culture media, La Guajira (Colombia).

Résumé

Les micro-algues sont la source de biomolécules et de métabolites d'importance économique et elles constituent une source directe de nourriture, de médecines et de biocombustible, entre autres applications. Le territoire de La Guajira (Colombie) présente des conditions adéquates pour le développement et la production de micro-algues à niveau industriel. Surtout, il faut mettre en relief l'intérêt dans la gestion de la production d'acides gras essentiels pour la santé humaine, tel qu'à la recherche sur l'obtention des huiles pour l'industrie croissante des biocombustibles de troisième génération. Cette étude a cherché, d'un côté, avancer dans le développement de sous-produits d'origine micro-algale à échelle industrielle en Colombie en utilisant des systèmes de culture fermés qui ne compétent pas avec la production d'aliment humaine sur les sols d'usage agricole et, d'autre côté, il faut souligner le bénéfice environnemental que cette production représente.

Mots-clés: Système de production, micro-algues, *Chlorella* sp. , avantage environnemental, La Guajira, Colombie.

Mots-clés descripteur: Microalgues-Croissance et Développement, microalgues-aspects environnementaux, microalgues -Cultures et médiatique de la culture, La Guajira (Colombie).

Introducción

Las microalgas son organismos autótrofos unicelulares, coloniales y filamentosos que habitan diversos ambientes acuáticos en todas las latitudes y ecosistemas del planeta. Son fuentes de biomoléculas y metabolitos de gran importancia económica y constituyen una fuente directa de alimento, medicamentos, forraje, fertilizantes y combustible, e incluso, como indicadoras de contaminación (Liang et al., 2004; Tseng, 2001; Yuan-Kun, 1997).

Las microalgas representan un sistema muy eficiente para la bioconversión de la energía luminosa, aunado a la utilización de los elementos nutritivos (nitrógeno, potasio y fósforo), el aporte de oxígeno y una producción de biomasa que puede ser utilizable en diferentes áreas en la industria. Las microalgas han adquirido gran importancia en los últimos años ya que presentan la solución a diversos problemas en aspectos de alimentación, producción de biomasa y metabolitos de alto valor agregado de origen natural. Las investigaciones sobre el cultivo de microalgas revisten gran importancia dada su amplia aplicación biotecnológica y comercial (Qiang et al., 2008). Las ventajas competitivas cada vez mayores de biodiesel han suscitado el interés de los inversores y los consumidores; este interés se ha expresado a través de un mercado en auge: “La industria mundial de biodiesel es uno de los mercados de más rápido crecimiento en la industria química nunca antes visto... la capacidad mundial, la producción y consumo de biodiesel crecieron en promedio un 32%/año durante 2000-2005, y la industria parece que va para las tasas de crecimiento aún más rápido...” (Scott & Bryner, 2006).

Al superarse la escala de cultivo experimental (a nivel de laboratorio), en las etapas siguientes (piloto e industrial) se presentan problemas volumétricos que se deben superar y controlar. Los cultivos en estas escalas pueden representar cuellos de botella tanto en empresas acuicultoras como en bioindustrias dedicadas a la explotación a gran escala. De esta forma, en el escalamiento surgen problemas de tipo biológico donde se deben identificar los rangos óptimos de parámetros como nutrientes, temperatura y suministro adecuado de luz a fin de obtener una eficiencia fotosintética adecuada, y por ende, la cantidad de biomasa necesaria para la viabilidad del proceso productivo y la obtención de subproductos tales como el aceite natural, biodiesel y glicerol. En los sistemas de cultivo masivo en exteriores tipo *raceway* la temperatura fluctúa en el ciclo diario, y en las épocas climáticas existe también la pérdida de agua por evaporación. Además, la producción de microalgas en exteriores puede ser afectada por la contaminación con otras algas y microorganismos que devoran las microalgas (Chisti, 2007).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar tres aspectos de la producción de *Chlorella* sp.: 1.) las fases de escalamiento, 2) la obtención de biomasa [materia prima] y, 3) la extracción del aceite natural sintetizado por las microalgas producidas en sistemas de cultivos propios. Así mismo, se destaca el beneficio ambiental que esta producción representa.

Con esta investigación se busca avanzar hacia el desarrollo de subproductos de origen microalgal a escala industrial en Colombia utilizando sistemas de cultivo cerrados que no compiten con la agricultura convencional ni con la producción de alimento humano.

Antecedentes

Las microalgas han sido aprovechadas a lo largo de la historia de la humanidad como fuentes de ricos nutrimentos para sus poblaciones. Sin embargo, no ha sido sino hasta la segunda mitad del siglo xx que se han investigado formas de uso industrial para potenciar su aprovechamiento masivo, principalmente en las áreas de la alimentación y medicina (Chamorro et al., 1996). Diferentes líneas de investigación han estado influidas por factores socioeconómicos en diferentes episodios históricos recientes. A partir de la escasez de alimentos en el mundo, entre los años 1935 y 1940 surgió el interés de desarrollar sistemas de algas tendientes a encontrar nuevas fuentes de proteínas. Esta fue la primera aplicación desarrollada a nivel industrial (Ciferri & Tiboni, 1985).

La biotecnología de microalgas se inicia formalmente cuando en los años 50 científicos alemanes comenzaron a cultivar microalgas en forma masiva para obtener lípidos y proteínas, reemplazando a

las proteínas animal y vegetal convencionales para consumo directo del ganado y del hombre. De esta manera, paulatinamente se fue acortando la ineficiente cadena alimentaria proteica que existía en aquel entonces. Durante el periodo 1955-1970 se realizaron avances en la tecnología del cultivo de algas y se ampliaron los objetivos de su utilización (Belay, 1997). Entre los años 1965 y 1980 el interés del cultivo de microalgas se concentró en la calidad del ambiente. Para esa época se comprobó que las microalgas podían jugar un papel importante en la transformación de la materia orgánica de las aguas residuales en biomasa y agua tratada, la que podía utilizarse posteriormente para riego y como biofertilizante (Ayala & Vargas, 1987; Kosaric & Nguyen, 1978). Entre los años 1975 y 1982, la crisis del petróleo hizo dirigir la investigación hacia fuentes alternativas como la aplicación biológica de la energía solar (Belay, 1997). En los últimos años, se ha sumado el interés por la obtención de biomoléculas de alto valor agregado, y se estima que el 60% de los recursos algales requeridos para la obtención de los ingredientes de base en la industria química extractiva o alimenticia proviene de cultivos (Borowitzka, 1998).

En el momento en el cual los científicos descubrieron la rapidez con la que las poblaciones de estos microorganismos crecían, con un rendimiento 20 veces mayor que la soya por unidad de superficie, los describieron como el alimento del futuro (Henrikson, 1994). Las microalgas poseen concentraciones de nutrientes poco comunes, las cuales son superiores a las observadas en cualquier especie de planta superior. Un gramo diario de microalga constituye una alternativa para complementar la deficiente dieta actual (Henrikson, 1994). El contenido en proteína de algunas algas es por término medio 65% en base seca de la biomasa algal, superior al de otros alimentos naturales (Pervushkin et al., 2001). En el caso de la *Spirulina*, es importante la elevada concentración de vitaminas, minerales y otros nutrientes. De esta forma, la ingestión de 5 gramos de ésta al día aporta cantidades apreciables de beta-caroteno (provitamina A), vitaminas E y complejo B, hierro y oligoelementos. Un pigmento de las microalgas es el betacaroteno, importante antioxidante y eficiente captador de radicales libres. Esta molécula orgánica —también denominada provitamina A— disminuye el riesgo de cataratas y enfermedades degenerativas de la retina, enfermedades que están relacionadas con el envejecimiento (Todd, 1999). Las microalgas representan una importante reserva de ácidos grasos omega-3 (Öthes & Pire, 2001), cuyos derivados son efectivos en la prevención y el tratamiento de ciertas patologías, incluyendo enfermedades coronarias, agregación plaquetaria, niveles anómalos de colesterol, y algunos tipos de cáncer, siendo además altamente promisorias para el tratamiento de ciertas formas de enfermedad mental (Romay et al., 2001). La especie *Chlorella vulgaris* es particularmente reconocida por la producción del CGF (por su sigla en Inglés) —proteínas, vitaminas y ácidos grasos— que contribuyen con la regeneración de células nerviosas, por lo cual se ha venido utilizando en investigaciones para combatir enfermedades como el Alzheimer.

En cuanto a la producción de aceites vegetales, la soya solo puede producir cerca de 446 litros por hectárea, la canola produce 1.190 litros por hectárea y la palma puede producir 5.950 litros por hectárea, lo cual es bajo comparado con los 136.900 litros por hectárea que pueden producir algunas microalgas (Christi, 2007). Por otra parte, desde el año 2008 los investigadores en la Swinburne University of Technology en Sarawak, Malasia, extrajeron lípidos (aceites) de microalgas del género *Chlorella*, que fueron usados como precursores para la producción de biocombustibles. Este ha sido un esfuerzo concertado de biotecnólogos e investigadores para acumular experiencias y conocimientos tendientes a enfrentar uno de los principales problemas del mundo moderno: fuentes de energía para su desarrollo. El proyecto de Swinburne University se concentra alrededor de *Chlorella protothecoides*, según el líder del proyecto y profesor asociado Clem Kuek, esta microalga tiene la capacidad de usar la luz o los azúcares como su fuente de energía para el crecimiento celular y la producción de metabolitos como los lípidos, de los cuales se obtienen los biocombustibles (Swinburne Sarawak Research & Consultancy Office, 2010).

En el plano nacional, el estudio de González et al. (2009) presenta una revisión de los métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel que se han utilizado en la obtención de lípidos provenientes de microalgas a nivel de laboratorio (métodos de extracción con solventes químicos, shock osmótico, extracción con fluidos supercríticos, autoclavado, extracción con ultrasonido, extracción asistida con microondas, extracción mediante destrucción mecánica,

extracción enzimática). Barajas et al., (2009), profundizó en la investigación a nivel de bioprospección de microalgas colombianas enfocándose en el crecimiento de diversas especies nativas y finalizó con la transesterificación de aceite sintético simulado de *C. vulgaris*, en el marco del proyecto apoyado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la Corporación Instituto de Morrosquillo, el Instituto Colombiano del Petróleo ICP-ECOPETROL, la Universidad Industrial de Santander y el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Alvear et al., en el año 2010, realizaron un estudio que tuvo como objetivo comparar la calidad y cantidad de aceite extraído de dos especies de microalgas, la halófila *Dunaliella salina* y una especie de agua dulce del género *Chlorella*, aislada en la bahía de Cartagena (Colombia), con el fin de evaluar su posible integración en la producción de biodiesel. Estos investigadores utilizaron la misma metodología para las dos especies de microalgas manteniendo condiciones óptimas para cada especie en cuanto a pH, concentración de nitrógeno, intensidad lumínica y temperatura. Por otra parte, la extracción del aceite se efectuó por el método Bligh y Dyer, posteriormente, la calidad del aceite se evaluó de acuerdo a la norma técnica colombiana. Los resultados demostraron una mayor producción de biomasa por día en *Dunaliella*, mientras la cantidad de aceite encontrado en la microalga *Chlorella* fue mayor. El aceite obtenido a partir de las dos especies presentó una calidad adecuada para la producción de biodiesel.

La sistemática, aislamiento, cultivo de cepas nativas y la extracción de aceites de microalgas presentes en Colombia, constituyen un objetivo esencial para evaluar su potencial biotecnológico en la producción de sustancias de interés comercial, el escalamiento industrial y su posible utilización en la producción de aceites y sus derivados. Debido a ello, ha sido de suma importancia implementar ensayos del crecimiento de microalgas aisladas en función de distintos factores ambientales, tales como la luz, la salinidad, la temperatura, el pH y los nutrientes. En el presente estudio se reporta el escalamiento bajo techo y en exteriores, así como la obtención de biomasa seca y aceites naturales de una cepa autóctona de la microalga *Chlorella* en el territorio de La Guajira, Colombia.

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 Acuícola del Centro Agroempresarial y Acuícola del Sena regional Guajira en las coordenadas 11°31'03.28"N y 72°52'07.71"W. Es un territorio con bosques secos tropicales y suelos semiáridos a muy áridos con vegetación xerofítica que registra una precipitación media anual de 250 mm, considerada la más baja del país. En la Cámara de Cultivo Indoor se cuenta con los servicios públicos, aunque el agua es deficiente se garantiza el suministro continuo para los diversos bioensayos de cultivo bajo techo. La etapa 2 de la investigación se ubica en suelo rural en el perímetro urbano del municipio de Riohacha, allí no hay servicio público de agua es carente, por lo que el recurso se obtiene de un pozo profundo ubicado en la misma unidad.

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 objetivos similares a los del presente estudio.

Escalamiento: microalga estudiada

Se seleccionó la microalga *Chlorella* sp., procedente del cepario ubicado en la Fundación Terrazul municipio de Riohacha. Su aislamiento se realizó mediante la técnica de dilución en serie en cultivo

selectivo líquido y sólido (ver Figura 1). Ambos enriquecidos con nutrientes inorgánicos Bristol (modificado). La ubicación taxonómica de la microalga se determinó mediante el uso de bibliografía especializada y claves taxonómicas.

Condiciones en cámara de cultivo bajo techo

Se sembró un inóculo de 0,5 ml de *Chlorella* sp., proveniente de la cepa mantenida en el cepario de la Fundación Terrazul, en tubos de ensayo de 20 mL con 10 mL de medio de cultivo Bristol (modificado), con fotoperiodo 12:12, temperatura de cultivo 19 ± 1 °C, pH de 7,5 y salinidad 0 ‰.

En todos los cultivos Indoor (ver Figura 2) se proporcionaron los siguientes parámetros: i) iluminación, se suministró por lámparas fluorescentes laterales a una intensidad luminosa de $58 \mu\text{mol quanta/m}^2\text{s}$; ii) medio de cultivo Bristol (modificado), con un fotoperiodo de 16:8 h, aireación constante, temperatura 28 ± 2 °C y a pH inicial de 7,5.

Condiciones de cultivo al aire libre

En el cultivo al aire libre se utilizaron botellones de policarbonato de 20 litros de capacidad como inóculos de 16 litros para los estanques tipo carrusel o *raceway* (nombre común en inglés) ubicados en la Unidad Acuícola del SENA regional Guajira (ver Figura 3). Este método de cultivo al aire libre en estanques tipo *raceway* es ampliamente utilizado. Se sembraron inóculos de 32 litros en un volumen de 1200 litros de agua de pozo profundo previamente tratada y fertilizada con medio de cultivo. El experimento se inició con un inóculo de 15.000 cel/mL en fase exponencial. El cultivo se mantuvo expuesto a la irradiación solar y al viento.

Crecimiento poblacional

Los conteos de las microalgas se realizaron de acuerdo a la técnica de Guillard (1973). Se usó un hematocítmetro o cámara de Neubauer de 0,1 mm de profundidad. Los conteos se realizaron diariamente en cada una de las muestras por triplicado de los diferentes volúmenes de cultivo. Las

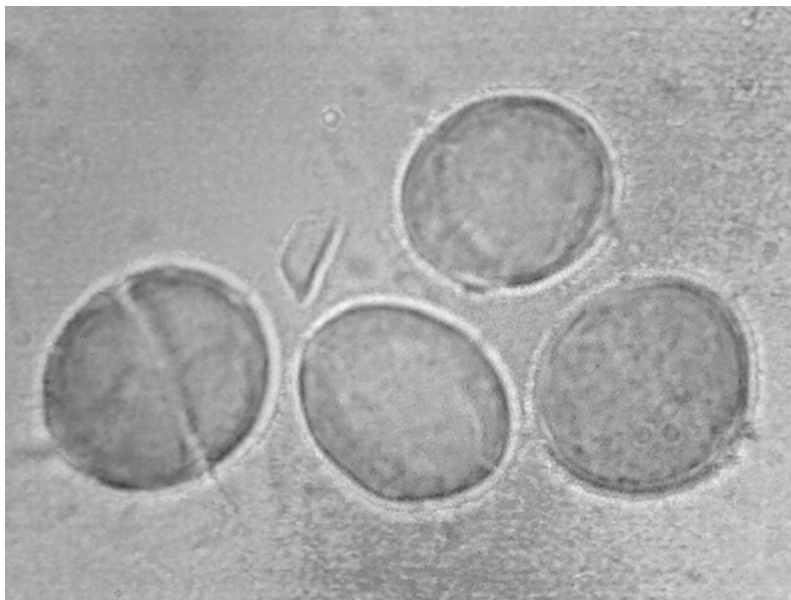


Figura 1: Vista en microscopio en aumento de 100 X

Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2012



Figura 2: Sistema de cultivo de *Chlorella* sp

Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2012



Figura 3: Tres prototipos raceway construidos y en operación con capacidad 1,2 m³ cada uno para el cultivo de microalgas en la Unidad Acuícola del Centro Agroempresarial y Acuícola SENA. Regional Guajira

Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2012

muestras obtenidas para los conteos de cada cultivo fueron de 0,5 mL; no se realizaron diluciones. De estas muestras se tomó una alícuota para llenar el hematocitómetro, y se determinó la concentración celular a través de un microscopio óptico ΜΥΚΟΝ a una magnificación de 40X, y un contador manual.

La densidad celular de la suspensión de algas se calculó de la siguiente forma:

$$\text{Número de células en } 0,1 \text{ mm}^3 = \frac{\text{Número total de células contadas}}{\text{Número de cuadros } 1 \text{ mm}^2 \text{ en el conteo}}$$

Este valor corresponderá al número total de células en $0,1 \text{ mm}^3$. Para obtener el número por mL se multiplica por 10,000.

Con estos datos se graficaron las curvas de crecimiento poblacional correspondientes para cada uno de los tratamientos (volúmenes de cultivo). Las curvas de crecimiento se analizaron de manera descriptiva.

Velocidad de crecimiento

La velocidad de crecimiento se calculó en fase logarítmica, mediante la ecuación:

$$m = \frac{\ln X_1 - \ln X_0}{t_1 - t_0}$$

Obtención de biomasa seca

En el punto más alto de producción de biomasa, se procedió a cosechar las microalgas de los *raceway*, para lo cual se utilizaron embudos de porcelana y filtros *wathman* de $2 \mu\text{m}$ de diámetro de poro con el fin de recolectar cada una de la microalgas, ya que el género *Chlorella* posee un tamaño que oscila entre los 2 y $10 \mu\text{m}$.

Extracción de aceites

A partir de la biomasa seca, se llevó a cabo la extracción de aceites naturales de microalgas, fundamentada en el equipo Soxhlet (Murry, 2001). Este método plantea los siguientes pasos: 1) Introducir el solvente (Cloroformo al 98%) en el balón aforado. 2) Ubicar el cartucho de celulosa con la muestra de biomasa seca en el equipo. 3) Se arma el equipo teniendo en cuenta que quede ajustado. 4) Iniciar el flujo de refrigerante en el condensador. 5) Encender la plancha de calefacción. En el momento en que la temperatura del solvente llegue a los $65 \text{ }^\circ\text{C}$, éste comienza a evaporarse, y se precipita en forma de gotas sobre el cartucho, de esta forma, el solvente extrae los aceites de la biomasa seca de microalgas.

Resultados y discusión

Escalamiento

Luego de inocular los tubos de ensayo de 20 mL las células crecieron y se dividieron cada vez más deprisa conforme se iban aclimatando a las condiciones de cultivo. La fase de crecimiento exponencial duró 6 días (ver Figura 4). La velocidad de división celular se ralentizó conforme se fue limitando la disponibilidad de los nutrientes. Fue entonces cuando el cultivo entró en la fase estacionaria, la población entró en una etapa de reciclado de nutrientes, de células muertas y en descomposición, por lo tanto, se pudieron producir metabolitos autoinhibidores que a la postre precipitaron el fin del cultivo.

En el escalamiento del cultivo desde 10 ml hasta 1200 litros, el comportamiento de las curvas de crecimiento fueron similares. La concentración máxima alcanzada en los cultivos en *raceway* fue de 2.410.000 células por mililitro, lo que permitió obtener 1534 gramos de biomasa húmeda. Las curvas de la densidad celular de *Chlorella* sp. indican que la cinética de crecimiento no depende del volumen del cultivo. Además, los resultados muestran la gran capacidad que tiene el género *Chlorella* de adaptarse a los diferentes ambientes de cultivo. Las especies de *Chlorella* son consideradas de alta resistencia a los cambios ambientales, incluyendo la deficiencia de nutrientes, por eso está presente en todo tipo de ecosistemas acuáticos y la literatura reporta sus adaptaciones a diferentes condiciones ambientales (Bicudo & Menezes, 2006).

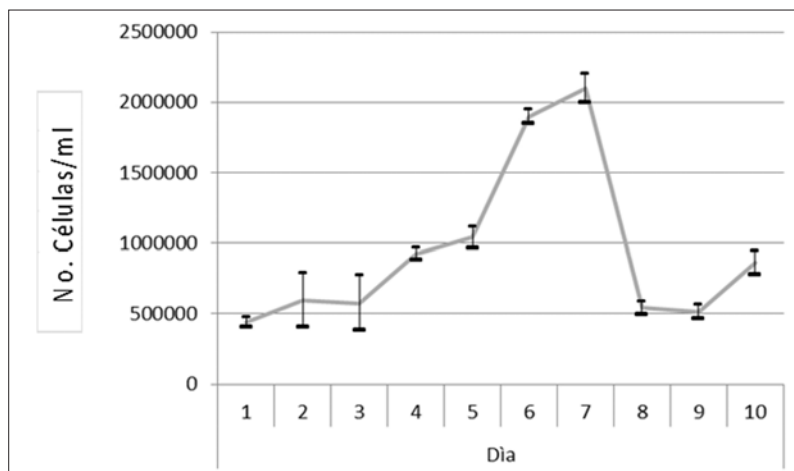


Figura 4: Curva de crecimiento poblacional de *Chlorella* sp. en 10 mL de medio de cultivo Bristol. Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2012

Fuente: Fundación Terrazul, Riohacha, 2012

Tasa de crecimiento de la población de algas

El cultivo en medio Bristol (modificado) para los tratamientos en volúmenes de cultivo de 10 mL, 400 mL, 3 L y 16 L presentó una tasa de crecimiento de 0,19, 0,21, 0,29 y 0,22 respectivamente. Los valores obtenidos en este proyecto estuvieron por encima de los reportados por Chinnasamy et al. (2009). En su investigación, Chinnasamy et al., expusieron los cultivos de *Chlorella vulgaris* en medio de cultivo Basal Bold (BBM) a diferentes temperaturas y concentraciones de CO₂. Estos obtuvieron tasas de crecimiento que van desde 0,12 a 0,22. La tasa de crecimiento de 0,22 la obtuvieron aumentando la concentración de CO₂ al 6% y una temperatura de 30 °C. Los valores de la tasa de crecimiento para los tratamientos bajo techo reportados anteriormente están por debajo del valor reportado por González (2010) quien efectuó cultivos en 200 mL de medio BBM en medios de cultivo con diferentes concentraciones de nitrógeno y fósforo y obtuvo tasas de crecimiento en promedio de 0,36. La diferencia entre los resultados obtenidos puede estar dada por la disponibilidad de nitrógeno en los medios de cultivo, ya que si el suministro de nitrógeno no es suficiente no se pueden formar suficientes proteínas para mantener los niveles óptimos de crecimiento (González, 2010). Sin embargo, en el cultivo de *Chlorella* sp. al aire libre realizado en *raceways* propios (ver Figura 3), se obtuvo una tasa de crecimiento de 0,71 lo que sugiere el estímulo positivo de las condiciones de luz natural, el tipo de agua y el intercambio con el medio exterior, no obstante, se requeriría un posterior análisis detallado de estos aspectos.

Biomasa y aceites naturales de *Chlorella* sp.

En el presente estudio se realizó el cultivo de *Chlorella* sp. en *raceways* de 1200 L de capacidad con el fin de obtener la biomasa necesaria para realizar la extracción de aceite. En la Figura 5 se observa el proceso de cosecha y secado de la biomasa húmeda de microalgas. En total se produjo 6348 gr de biomasa húmeda y un total de 2885 gr de biomasa seca (ver Tabla 1). Allí también se exponen los diferentes lotes de producción cosechados en el periodo de investigación en los estanques o *raceways* al aire libre.

En la extracción de aceites naturales de *Chlorella* sp. se utilizó un total de 240 gramos de biomasa seca. Una vez finalizó la operación de extracción, se obtuvo la mayor cantidad de aceite en cada proceso. Posteriormente, mediante evaporación y condensación se extrajo el exceso de solvente. Se obtuvo un total de 96 mL de aceite, el cual se depositó en un cono de decantación con el fin de extraer los sólidos suspendidos dentro del aceite. Así pues, se obtuvo una eficiencia del 40% en la extracción de aceite,



Figura 5: Depósito de la biomasa húmeda de *Chlorella* sp., sobre bandejas plásticas para secado

Fuente: Fundación Terrazul, 2012

Tabla 1
Biomasa húmeda y seca obtenida del cultivo al aire libre en *raceways* del presente estudio

FECHA	CÓDIGO DE LA MUESTRA	VOLUMEN DE LA MUESTRA (L)	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)
12/08/2012	PI - SENA 12082012	1.200	1.534	736
12/08/2012	P2 - SENA12082012	1.200	1.465	645
12/08/2012	P3 - SENA12082012	1.200	1.624	775
22/09/2012	PI - SENA22092012	1.200	516	231
22/09/2012	P2 - SENA22092012	1.200	495	214
22/09/2012	P3 - SENA22092012	1.200	714	284
TOTAL			6.348	2.885

Fuente: elaboración propia

lo cual es superior al rango de 28 a 32% reportado por Chisti en el 2007 a partir de biomasa seca de *Chlorella vulgaris*. Ahora bien, la obtención de aceite natural a partir de biomasa seca de *Chlorella* sp. en este proyecto genera un avance importante hacia la prospección de biocombustibles con microalgas colombianas, ya que según lo descrito por Barajas et al., 2009, en su bioprospección era necesario producir cantidades de biomasa que posibilitaran la extracción de aceite para evaluar su composición, no obstante, ante la imposibilidad de producir la biomasa algal necesaria efectuaron el proceso de transesterificación a partir de aceite sintético simulando el aceite de *Chlorella vulgaris*.

Al aceite extraído se le realizó una cromatografía líquida corrida, en la que se determinó una mayor proporción de ácidos grasos libres en la muestra, lo que nos indica que el aceite se extrajo en forma química. Esto se corroboró al determinar el valor ácido del aceite que está en 52,1 mg KOH/g de aceite.

Según lo reportado por Ötles & Pire (2001), la proporción de ácidos grasos libres en *Chlorella* es mayor, siendo los ácidos grasos insaturados los que se encuentran en mayor cantidad 66,46%, seguidos por los ácidos grasos saturados 25,26%, y otros 8,28%. La tasa entre insaturados y saturados para *Chlorella* está en el orden de los 2,63, y en el grupo de otros, se destaca la cantidad de alfa-linolenicos con un 15,79%. El ácido alfa-linolenico (AAL) es el verdadero ácido graso “esencial” omega-3 requerido en nuestras dietas, debido a que nuestros cuerpos no lo producen. El AAL reduce la inflamación, la cual es una característica de muchas enfermedades crónicas, como las enfermedades del corazón, las embolias y el cáncer (Morris, 2007).

El proceso de transformación de la luz solar, el CO₂ atmosférico y nutrientes en la producción de materia prima (biomasa y aceite) utilizable en la generación de productos alimenticios, aceites refinados, nutracéuticos y biocombustibles, posibilita proyectar un mecanismo de desarrollo limpio para La Guajira y sus habitantes por medio del cual tengan la oportunidad de iniciar propuestas productivas que no solo beneficien social y económicamente a la región, sino que también contribuya positivamente a la protección del clima global mediante la captación de dióxido de carbono.

Beneficio ambiental

Es importante resaltar el beneficio ambiental de este tipo de cultivos, ya que estos procesos de producción en los que se retira dióxido de carbono de la atmósfera son conocidos como “sumideros”. Estos sumideros almacenan carbono en compuestos orgánicos y constituyen una forma de mitigación del efecto invernadero. El escalamiento a nivel industrial del cultivo de microalgas permitiría captar grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto otorga la opción de canalizar la asistencia técnica de los países industrializados a las naciones en desarrollo, para orientarlos en un desarrollo menos contaminante y evitar emisiones. El MDL está destinado a cumplir los objetivos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático y del Protocolo de Kyoto, dentro de estos objetivos está el apoyar a los países que así lo requieran en su desarrollo sostenible.

De esta forma, los países en desarrollo como Colombia podrán ejecutar proyectos en forma independiente a través del Estado o de la empresa privada, como también en compartir esta gestión con un país industrializado inversionista, el cual podrá deducir de sus obligaciones de Kyoto las reducciones logradas en el país contraparte en desarrollo. Así mismo, el país en desarrollo, en este caso Colombia y el territorio de La Guajira, específicamente, podrá vender los certificados de reducción directamente a países industrializados.

Por otro lado, los Créditos de Carbono (CER) son unidades generadas a partir de proyectos del MDL; es la certificación dada por escrito de que durante un periodo determinado una actividad de proyecto consiguió la reducción de las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero, (GEI). Se define la reducción de emisiones según el Protocolo de Kyoto como, “todo derecho, interés, crédito, título, beneficio o permiso del País Anfitrión de emitir (presente y futuro) que provenga de o con respecto a toda reducción de gases efecto de invernadero, realizada por el proyecto que incluye todo derecho que puede ser creado según un determinado régimen legal o a través de contrato, como resultado de reducciones de los GEI” (Marat, 2012).

Conclusiones

La cinética de crecimiento de *Chlorella* sp. no depende del volumen de cultivo empleado, aunque sí de los aportes o agregados al medio de cultivo y las factores ambientales condicionantes tales como la temperatura ambiental que, en La Guajira es alta en comparación con otras regiones del país y, por lo tanto, la temperatura del agua se mantiene en rangos óptimos para el crecimiento de esta especie. Adicionalmente, el nivel de brillo solar en el departamento de La Guajira se encuentra en niveles más altos con respecto a las demás regiones del país lo que permite un mayor aprovechamiento de la luz solar

por parte de las microalgas, es decir, mayor productividad, y convierte a la Guajira en una de las zonas más adecuadas para el desarrollo de la industria de la producción de microalgas.

La tasa de crecimiento obtenida en el cultivo “*outdoor*” en *raceways* propios y la biomasa obtenida en cada ciclo de producción, permite proyectar el escalamiento a nivel industrial para la producción de grandes cantidades de biomasa con valores promedio del 40% de producción de aceite natural obtenido.

Es necesario implementar proyectos de refinamiento de estos aceites que permitan categorizar ácidos grasos esenciales para la salud humana y biocombustibles para el desarrollo industrial, así como la producción de otros alimentos e insumos naturales con variedades algales que, de ninguna forma compiten con tierras aptas para la agricultura de producción de alimento humano, ya que los sistemas de cultivo, preferiblemente, se deben implementar en zonas donde la humedad sea baja y el nivel de precipitaciones sea el menor posible, características propias de áreas desérticas como las encontradas en la mayor parte del territorio guajiro.

La alta dependencia de los ciudadanos de La Guajira con respecto de los recursos denominados de “regalías” provenientes de la industria minera, —principalmente del carbón— se ha visto afectada tras la reciente modificación en la legislación de las regalías (Acto Legislativo 005 de 2011) lo que ha llevado a una disminución superior al 50% en inversión pública en este departamento. Se deben explorar acciones en innovación de productos y servicios que puedan ser transferidas a esta sociedad inmersa en un territorio con grandes extensiones de tierras áridas no aptas para producción agrícola convencional. Estimulando la vocación acuícola en campesinos, jóvenes emprendedores y agricultores de La Guajira y con el apoyo institucional de los centros de desarrollo, es factible el aprovechamiento de las microalgas con fines alimentarios e industriales que den alcance a su bienestar social.

El beneficio ambiental de la producción de microalgas es bastante relevante, ya que los sumideros almacenan carbono en compuestos orgánicos y constituyen una forma de mitigación del efecto invernadero. En este marco, el escalamiento a nivel industrial del cultivo de microalgas permitiría captar grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera, y con ello, se estarán adoptando los mecanismos de producción limpia promulgados en el Protocolo de Kyoto en aras del desarrollo sostenible de los países del tercer mundo.

Agradecimientos: al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), al SENA regional Guajira y su Centro Agroempresarial y Acuícola 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 servicios cuyo propósito y fin es elevar sus niveles de productividad y competitividad.

Referencias

- Alvear, M., Castillo, C., Henao, D., & Tejeda, L. (2010). *Obtención y comparación de los aceites obtenidos de las microalgas Dunaliella salina y Chlorella nativa como materia prima para la producción de biodiesel*. [World Congress & Exhibition Engineering 2010] Argentina, October 17th-20th, 2010, Buenos Aires, Argentina.
- Ayala, F., & Vargas, T. (1987). Experiments on *Spirulina* culture on waste-effluent media at the pilot plant. *Hydrobiologia*, 8 (151/152), 91-93.
- Barajas, A., Garzón, L., González, A., Guzmán, A., Kafarov, V., Moreno, N., Núñez, M., Plata, V., & Velásquez, G. (2009). *Bioprospección de microalgas colombianas para la producción de biodiesel*. Centro de Investigaciones para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía, Universidad Industrial de Santander, Instituto Colombiano del Petróleo ICP ECOPEPETROL, Instituto Corporación Morrosquillo.
- Belay, A. (1997). Mass culture of *Spirulina* outdoors. In A. Vonshak (Ed.), *Spirulina (Arthrospira) platensis: Physiology, cell-biology and biotechnology*. London: Taylor and Francis, 131-158.
- Bicudo, M., & Meneses, C. (2006). *Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: Chave para identificação e descrições*. Rima São Carlos Brasil, 2da ed.
- Borowitzka, M. (1998). Commercial production of microalgae: Ponds, tanks, tuber and fermenters. *J. of Biotech*, 70, 313-321.
- Chamorro, G., Salazar, M., & Favila-Castillo, L. (1996). Farmacología y toxicología del alga *Spirulina*. *Rev. Invest. Clin*, 48, 389-399.
- Chinnasamy, S., Ramakrishnan, B., Bhatnagar, A., & Das, K. (2009). Biomass production potential of a wastewater alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under elevated levels of CO₂ and temperature. *Int. J. Mol. Sci.* 10, 518-532.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 294-306.
- Ciferri, O., & Tiboni, O. (1985). The biochemistry and industrial potential of *Spirulina*. *Ann. Rev. Microbiol*, 39, 503-526.
- González, A., Kafarov, V., & Monsalve, A., (2009). Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas. *Prospect*, 7(2), 53-60, julio-diciembre de 2009.
- González, L. (2010). *Influencia de la deficiencia de nitrógeno y fósforo en las interacciones competitivas entre Chlorella vulgaris y Scenedesmus acutus*. [Trabajo de grado para MSc]. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Departamento de Biología. Bogotá.
- Guillard, R. (1973). *Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates*. Woods Hole, Oceanography. Massachusetts.
- Henrikson, R. (1994). *Microalga Spirulina*, superalimento del futuro (2ª. ed.): España: Ediciones Urano.
- Kosaric, N., & Nguyen, H. (1978). Growth of *Spirulina maxima* algae effluents from secondary waste water treatment plants. *Biotechnology and Bioengineering*, 14, 881-896.
- Liang, S., Liu, X., Chen, F., & Chen, Z. (2004). Current microalgal health food R & D activities in China. *Hydrobiologia*, 512, 45-48.
- Marat, M. (2012). *MDL y bonos verdes como instrumento para la financiación de proyectos hidroeléctricos*. Argentina: Fundación del Tucumán.
- Morris, D. (2007). *Linaza un producto premier de salud y nutrición*. Winnipeg, MB: Consejo Canadiense de Linaza. 2. Instituto de Medicina. Consumos.

- Murry, J. (2001). *Química orgánica*. México: International Thomson editores.
- Örtes, S., & Pire, R. (2001). *Fatty acid composition of Chlorella and Spirulina microalgae species*. J. AOAC Int., 84, 1708-1714.
- Pervushkin, S., Voronin, A., Kurkin, V., Sokhina, A., & Shatalaev, I. (2001). *Proteins from Spirulina platensis biomass*. Chemistry of Natural Compounds, 37(5), 476-481.
- Qiang, H., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., & Darzins, A. (2008). *Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: Perspectives and advances*. USA.
- Romay, C., Ramírez, D., & González, R. (2001). Actividad antioxidante de la ficocianina frente a radicales peroxílicos y la peroxidación lipídica microsomal. *Rev. Cubana Invest. Biomed*, 20(1), 38-41.
- Scott, A., & Bryner, M. (2006). Alternative fuels: Rolling out next-generation technologies, *Chemical Week*, Dec. 20-27, 17-21.
- Swinburne Sarawak Research & Consultancy Office (2010). Página web de Swinburne. Recuperado el 12 de julio de 2012 de <http://www.swinburne.edu.my>
- Todd, L. (1999). A review of *spirulina* and *haematococcus* algae meal as a carotenoid and vitamin supplement for poultry (No. 53): *Spirulina Pacifica Technical Bulletin*.
- Tseng, C. (2001). Algal biotechnology industries and research activities in China. *Journal of Applied Phycology*, 13, 375-380.
- Yuan-Kun, L. (1997). Commercial production of microalgae in the Asia Pacific rim. *Journal of Applied Phycology*, 9, 403-411.