

## EFICIENCIA GLOBAL EN LA CONVERSION DE ENERGIA SOLAR EN BIOMASA DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE *ARTHROSPIRA PLATENSIS* (SPIRULINA).

Mabel Medina<sup>1</sup>, Miguel A. Lara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>- Consejo de Investigaciones. (Univ. Nac. Rosario). Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, (UNR)

<sup>2</sup>-Instituto de Física Rosario –IFIR- (CONICET- UNR). Facultad de Ciencias Agrarias (UNR).

e-mail. [mmedina@fceia.unr.edu.ar](mailto:mmedina@fceia.unr.edu.ar) / [malara@fceia.unr.edu.ar](mailto:malara@fceia.unr.edu.ar)

Av. Pellegrini 250, (2000) Rosario. Argentina.

**RESUMEN:** La spirulina (*Arthrospira platensis*) es una microalga que se utiliza como un suplemento dietario en alimentación humana y animal. En el presente trabajo se calcula la eficiencia global de una planta de producción de spirulina, definiendo eficiencia global como el cociente entre la radiación solar recibida y la energía de la biomasa seca recolectada durante un período de 16 meses. En base a los datos registrados en la planta, se muestran las productividades y eficiencias mensuales por estanque. Se obtiene una eficiencia global promedio de 0.4 %. Se analizan las posibles causas de este valor considerado bajo y se propone como mejorarlo.

**Palabras clave:** Spirulina, estanques de producción, eficiencia fotosintética.

### INTRODUCCIÓN

La spirulina (*Arthrospira platensis*) es una microalga (Figura 1, a) que se utiliza como un suplemento dietario en alimentación humana y animal. Es más rica en proteínas que la carne con una concentración variable entre el 55 y 70% de sustancias asimilables de alta calidad (Falquet, 1996). Entre las vitaminas que contiene se encuentran la A, B1, B2, B3, B6 y B12, ácido fólico, biotina, inositol, ácido pantoténico, beta caroteno y vitamina E, junto con minerales que actúan como potentes antioxidantes que permiten la neutralización de los radicales libres. Presentes están también los siguientes minerales: Calcio, Fósforo, Hierro, Sodio, Potasio, Zinc, Cobre, Manganeseo, Germanio, todos en concentraciones apreciables. La biodisponibilidad del hierro es un 60% más elevada que en las maneras habituales de suministro en otras formas dietarias.



Figura 1 a) Imagen de la microalga

Puede utilizarse como suplemento en la alimentación de diversos animales: rumiantes, cerdos, aves, peces y crustáceos, como una fuente proteica o como complemento de proteínas en dietas balanceadas. Aumenta el valor comercial de ciertas especies, por ejemplo; mejora la coloración de la piel y de la yema de huevos en aves y también aumenta la vitalidad, el peso y la coloración en peces (Fox 1999).

Actualmente es cultivada en grandes establecimientos en Estados Unidos, India, China y Tailandia. Para dar idea de la importancia de este cultivo, la industria de la spirulina en China está desarrollándose rápidamente como un programa estratégico nacional. En 1997, había 80 lugares de producción, con un total de producción anual de más de 350 toneladas de polvo seco y un área de producción de 10<sup>6</sup> m<sup>2</sup> (Ding-Mei Li, Yu-Zao Q, 1997). En Argentina, su cultivo comenzó en la década del noventa.



Figura 1 b) Fotografía exterior de los estanques 1 y 2.



Figura 1 c) Fotografía interior de los estanques 3 y 4.

La producción comercial se realiza en estanques de varias decenas de metros de largo por 4 o 5 metros de ancho, con una profundidad media de 0.15 m, con una cubierta tipo invernadero (Figura 1, b y c). La cubierta permite que se cultive en un

<sup>2</sup> Investigador CONICET

ambiente controlado, protegido de la polución y con posibilidades de acondicionamientos térmicos. En los estanques se realiza un control constante de las variables: temperatura, agitación, alcalinidad, salinidad y control microbiano de crecimiento que son fundamentales para optimizar la producción. El medio de cultivo nutritivo se mantiene constante y corresponde a la fórmula de Falquet (1999). Se considera como producción media  $10 \text{ gr m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . Para cosecharlas, se separaran del medio de cultivo por filtración, y luego son secadas como única forma de garantizar la conservación de sus propiedades en el tiempo (Chini Zittelli et al., 1996).

El grupo de investigación del Laboratorio de Energías Alternativas (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Conicet), a través de un proyecto de I+D, se encuentra trabajando en colaboración con la empresa productora de spirulina Campo Esmeralda SRL. Esta empresa comenzó su actividad comercial en septiembre de 2003, con una planta piloto ubicada en la localidad de San Jorge, Provincia de Santa Fe.

La planta piloto cuenta con 4 estanques de producción y uno de inóculo (Figura 2). Los primeros dos estanques de producción miden de 10.80 m de largo por 4.80 m de ancho, con una profundidad 0.20 m. Fueron construidos sobre una capa de arena de 0.03 m que reposa sobre una losa de hormigón de 0.10 m. Para elevar la temperatura del medio de cultivo en invierno se dispusieron cubiertas tipo invernadero a dos aguas, de polietileno LDT de  $150 \mu\text{m}$  de espesor, con una altura máxima de 1.15 m en la parte central. La superficie total de cultivo es hasta el momento de  $148.51 \text{ m}^2$ .

El acondicionamiento térmico de los estanques permite continuar con la producción durante el invierno, al mantener el medio de cultivo con temperaturas superiores a los  $12 \text{ C}$ , a diferencia de otras instalaciones que sólo producen durante 6 meses al año. La masa algal se cosecha de los estanques por filtración, se centrifuga para sacar el agua remanente, se seca por aire caliente y se muele hasta obtener el polvo de espirulina. Luego es enviada a laboratorios donde se convierte en comprimidos para su comercialización (Medina, 2004). El producto final es una caja con 60 comprimidos de 0.500 g.

El objetivo de este trabajo es hacer un análisis de la eficiencia de la producción en el período 1 de enero 2004- 30 de abril 2005, en base a los datos recogidos en la planta. Este análisis podrá permitir identificar algunos de los factores a mejorar en el proceso de la producción de biomasa algal.

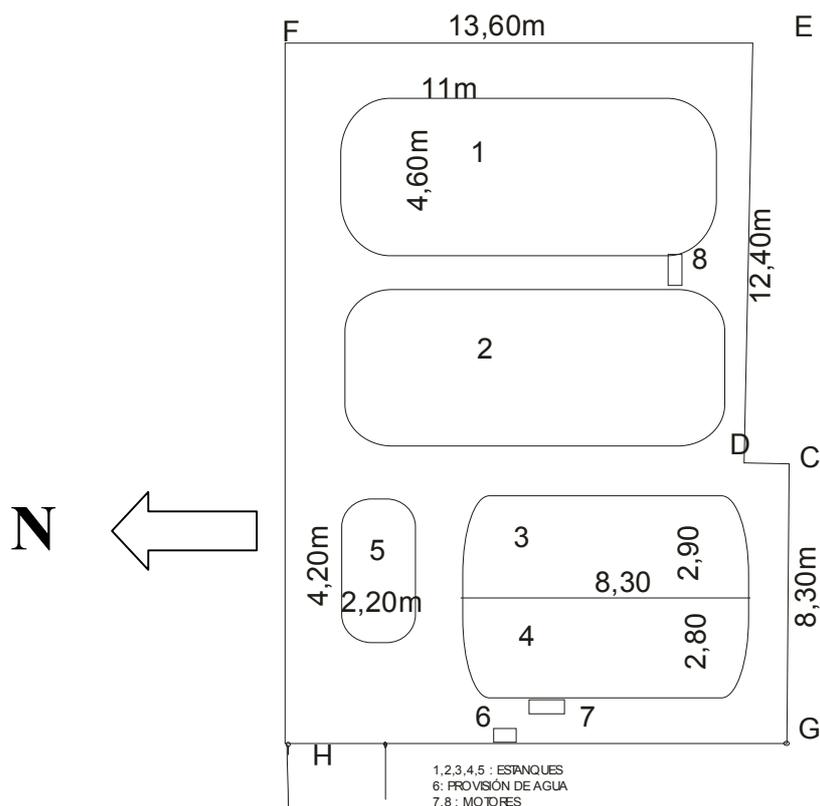


Figura 2: Esquema de los estanques en la planta de producción, donde se aprecia la orientación.

## EFICIENCIA DE UN CULTIVO

### Eficiencia fotosintética

Se puede determinar cuan eficiente es la conversión de la luz solar recibida por las plantas en energía química como carbohidratos, si se define como eficiencia fotosintética (Photosynthetic Efficiency, P.E por sus siglas en inglés) el cociente entre la energía química en compuestos de carbono de una biomasa fotosintética y la energía solar (Walker, D. 1993).

En el complejo proceso fotosintético se transforma el CO<sub>2</sub> y el agua a través de la clorofila y de la radiación en un carbohidrato más oxígeno. La eficiencia fotosintética máxima teórica puede estimarse en un 10 %, considerando que 10 fotones son necesarios para fijar una molécula de CO<sub>2</sub>, un mol de CO<sub>2</sub> es equivalente a 477 KJ, los fotones útiles (longitud de onda entre 430 y 700 nm, photosynthetically active radiation, PAR) tienen un promedio de energía de 217 KJ por mol y solamente el 45% de la luz solar tiene la longitud de onda deseada (Miyamoto, 1997).

Aunque la utilización potencial de la energía solar ha sido estimada teóricamente alrededor del 10 %, la eficiencia real de cultivos en la conversión de energía solar está entre 0.3 % y 1.5 %. Por ejemplo, se registró una P.E: de 0,4 % en cultivos de papas (Patzek, 1997), aunque en experimentos de corta duración, la caña de azúcar cuya eficiencia fotosintética es muy alta ha alcanzado valores entre el 6 y 7%.(Teruo Higa, James F. Parr, 1994). En el cultivo de microalgas en estanques, con cubierta invernadero, se reportan experimentos en laboratorio donde el rendimiento se encuentra entre el 4 y el 6 % durante los meses de verano (Hase et al., 2000).

Estos bajos valores de fotoeficiencia son debidos al fenómeno de fotoinhibición, la fotosíntesis puede ser muy eficiente con valores bajos de intensidad lumínica pero con valores altos de intensidad lumínica el aparato fotosintético no es capaz de procesar toda la energía recibida (Tredici, 2004).

#### Eficiencia global (EG) de conversión de energía solar de un cultivo de microalgas

Se puede introducir un concepto más amplio que el anterior definiendo la eficiencia global como

$$EG = \frac{Eb}{Es} \quad (1)$$

donde: *E<sub>b</sub>* es la energía de biomasa diaria producida por unidad de área y *E<sub>s</sub>* es la energía solar diaria promedio mensual

La diferencia entre este concepto y el anterior, es que en el cálculo de la eficiencia fotosintética se toma en cuenta la energía que recibe el cultivo, en cambio la eficiencia global toma en cuenta la energía promedio solar diaria que llega a la superficie terrestre en el lugar del cultivo. En la *EG* se toman en cuenta otros factores además de la fotoinhibición como la reducción de la energía recibida debido a la utilización de cubiertas de invernadero, problemas operacionales que no permiten una producción continua de biomasa, etc.

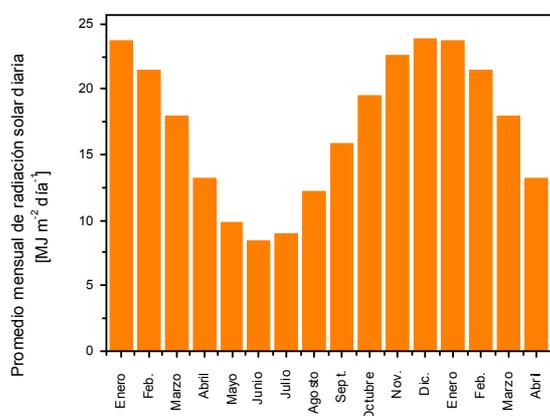


Figura 3: Radiación solar diaria promedio para la ciudad de San Jorge, provincia de Santa Fe.

Para el cálculo de la Eficiencia Global (*EG*) en la planta productora de spirulina, se utilizan los valores promedio mensual de radiación solar diaria en base a las cartas de radiación confeccionadas por Grossi Gallegos (1997) referidas a la localidad de San Jorge (31.50 latitud sur y 31.50 longitud oeste), provincia de Santa Fe. El periodo graficado es desde enero 2004 hasta abril 2005, debido a que es el periodo donde se analizan los datos de producción. Los valores de *E<sub>s</sub>* (energía solar diaria promedio mensual) están graficados en la figura 3.

Para el cálculo de *E<sub>b</sub>* (energía de biomasa diaria producida por unidad de área) se toma la producción diaria (obtenida como el promedio de un mes) y se multiplica por el valor promedio de 23 KJ por gramo de biomasa seca (Tredici, 2004; Hase, 2000).

Aplicando la expresión (1) se obtienen los valores mensuales de *EG*.

#### ANALISIS DE LOS DATOS DE LA PLANTA PRODUCTORA

La empresa Campo Esmeralda SRL, productora de polvo de spirulina, lleva registros de la cantidad de masa húmeda recolectada por estanque en cada cosecha y de la cantidad de masa seca obtenida respectivamente. Se analizan los datos obtenidos en el periodo comprendido entre el 1 de enero 2004 al 30 de abril 2005.

En base a estos datos, se realizan las figuras 4 a) y 5 a) donde se puede observar la producción de masa seca promedio por área y por día. En este tipo de cultivos, es de esperar una producción mayor durante los meses de primavera y verano a causa de las condiciones favorables de temperatura y radiación solar. La máxima productividad promedio mensual se observa par el estanque 3, y es de 6,4 gr m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. En los meses de invierno la producción es menor, como por ejemplo en el mes de julio 2004 donde el estanque 2 es el único que produce. Los problemas operacionales tales como rotura del film impermeable del

piso del estanque, rotura del agitador a paletas (molino), etc, hacen que no haya producción en algunos meses, como por ejemplo en noviembre y diciembre 2004 en el estanque 2. Una mención particular merece la falta de producción del estanque 4 en el mes de enero 2004, esta fue a causa del aislamiento del piso de poliestireno expandido que se introdujo para un mejor rendimiento térmico en los meses de invierno, según se calculó en Medina (2003). En los meses de verano, el estanque levantó altas temperaturas que arruinaron el cultivo, debiendo rehacerse el estanque con la estructura anterior de piso, que contempla una capa de arena.

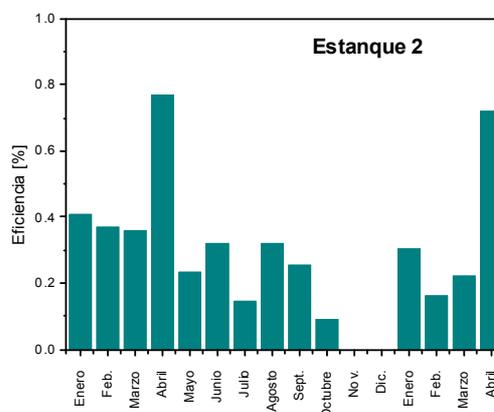
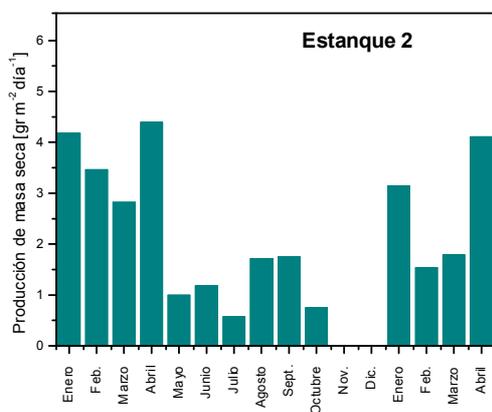
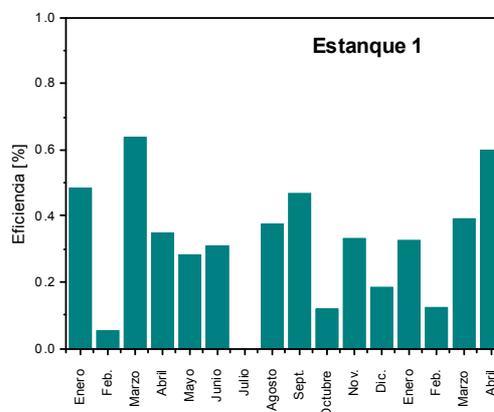
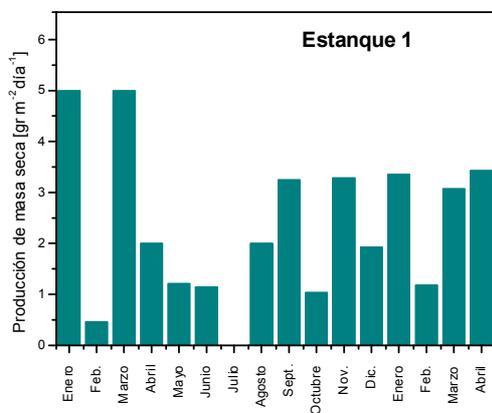


Figura 4 a) Producción de masa seca diaria promedio mensual por unidad de área. Estanques 1 y 2. Período analizado enero 2004/abril 2005.

Figura 4 b) Eficiencia Global en promedio mensual. Estanques 1 y 2. Período analizado enero 2004/abril 2005.

En las figuras 4 b) y 5 b) se muestra el cálculo de la Eficiencia Global promedio mensual de cada uno de los estanques. Como se observa en los gráficos esta varía apreciablemente, entre 0.12 y 0.87 %, en los meses donde hay producción. El valor máximo es obtenido por el Estanque 4, durante el mes de abril 2004.

En la tabla 1, se muestra un resumen de la producción y eficiencia de los estanques y de la planta en general. Es de notar que tuvo una producción en 16 meses de 157.84 kg de masa seca, proveniente de 680.02 kg de masa húmeda. Se obtiene un promedio de 0.23 veces de masa húmeda en masa seca. En cuanto a la productividad por unidad de área la máxima se tiene para el estanque 4, y es de 3.41 gr m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, que está bastante alejado de una productividad promedio, que en este tipo de estanques de 10 gr m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Es de notar que la productividad promedio es en casi todos los estanques mayor en el período P1, primavera/verano, como cabría esperar pero con diferencias no significativas.

Muy interesantes son los datos de la eficiencia global, la cual en todos los casos es mayor en el período total que en el período de mayor insolación, primavera/verano. Esto nos estaría informando sobre la performance de conversión de la energía solar a través de todo el proceso. De acuerdo a estos valores de eficiencia, los estanques son más eficientes en invierno que en verano. La explicación sería que están mejor diseñados para trabajar con bajas temperaturas ambientes, protegidos con la cubierta de invernadero, cuando la eficiencia fotosintética de las algas es máxima con baja intensidad de luz. De todas formas se está ante un valor de eficiencia global total de 0.4 %, igual al de las papas del trabajo de Pazek, 1997. Se estima que es un valor bastante bajo, pues cabría esperar para una productividad promedio de 10 gr m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, y un promedio anual de radiación diaria de 16.4 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> que la eficiencia global sea de 1.4%. El estanque 4 es el que presenta mayor eficiencia global durante los meses que estuvo productivo, seguido del estanque 3. Esto es razonable ya que los estanques están pegados (ver figura 3) con condiciones similares de insolación. Los estanques 1 y 2 presentan iguales eficiencias globales en todo el período, pero el estanque 1 es más productivo en el período primavera/verano. La explicación

puede obtenerse en que la ubicación del estanque 1 es más sombreada en verano, evitando el fenómeno de fotoinhibición y controlando mejor la temperatura.

Una forma de mejorar el rendimiento en el período primavera/verano es sacar la cubierta de invernadero, lo que permite controlar mejor la temperatura a través de la evaporación. Esto implica mayor radiación solar que puede causar fotoinhibición, para lo cual se debe tener una alta concentración de cultivo y una fuerte agitación a través de los molinos, de acuerdo a lo expresado en Tredici, 2004.

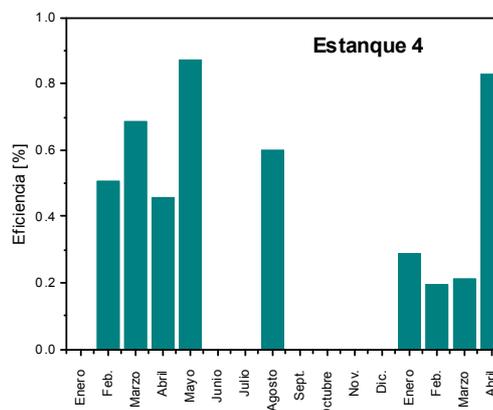
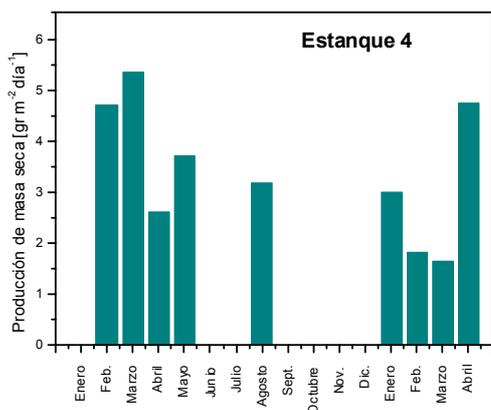
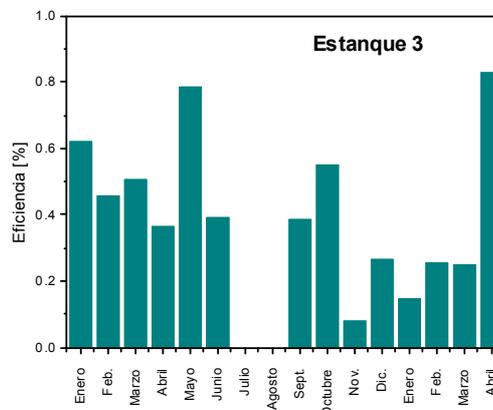
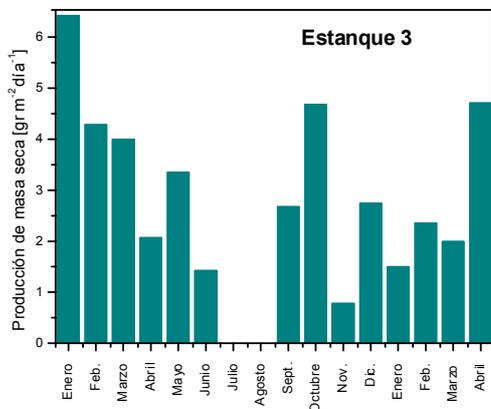


Figura 5 a) Producción de masa seca diaria promedio mensual por unidad de área. Estanques 3 y 4. Período analizado enero 2004/abril 2005.

Figura 5 b) Eficiencia Global en promedio mensual. Estanques 3 y 4. Período analizado enero 2004/abril 2005

Estanque		1	2	3	4	Total
Superficie [m <sup>2</sup> ]		50.6	50.6	24.07	23.24	148.51
Producción total masa húmeda [kg]	P1	157.42	117.52	91.46	49.57	415.97
	P2	240.06	212.84	134.91	92.21	680.02
Producción total masa seca [kg]	P1	36.79	26.70	20.73	11.50	95.72
	P2	56.41	49.00	31.01	21.42	157.84
Producción total diaria por unidad de área [gr m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ]	P1	2.69	2.51	3.19	3.30	2.92
	P2	2.65	2.30	3.06	3.41	2.86
Eficiencia global (EG) promedio [%]	P1	0.295	0.276	0.349	0.376	0.324
	P2	0.335	0.335	0.421	0.516	0.401
Meses productivos sobre un total de 9	P1	9	7	9	4	9
Meses productivos sobre un total de 16	P2	15	14	14	9	16

Tabla 1: Análisis de la productividad y de la Eficiencia Global durante dos períodos de tiempo, P1 y P2. P1 corresponde a los meses de mayor insolación, primavera/verano: 1 de enero 2004/ 31 de marzo 2004 – 1 de octubre 2004/31 de marzo 2005. P2 es el período total, 1 de enero 2004/ 30 de abril 2005. Los valores de productividad diaria y de eficiencia global son calculados con el promedio de los meses donde hay producción.

En las dos últimas filas de la tabla 1 se muestran los meses productivos de cada estanque. El estanque 1 ha sido el que ha estado produciendo con más regularidad, mientras que el estanque 4 es el que más meses ha estado inactivo. Los meses donde no ha habido producción ha sido debido a problemas operacionales, como roturas de molinos de agitación, roturas de film impermeable de piso, roturas de la cubierta invernadero, etc. Esto se debe a la poca experiencia existente en este cultivo no tradicional. La planta comenzó oficialmente a funcionar en septiembre de 2003 y podríamos considerar que se está en un periodo de aprendizaje, mejorando en el año 2005 donde todos los estanques han estado productivos.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se han analizado los datos de producción de la microalga spirulina correspondiente a la planta de la empresa Campo Esmeralda SRL. De este análisis se desprende que la eficiencia global promedio de la conversión de energía solar en biomasa es de 0.4 % durante el periodo 1 de enero 2004 hasta el 30 de abril 2005, siendo menor aún durante los periodos primavera/verano. Se considera que este valor es bajo a causa de los problemas operativos que debió afrontar la empresa debido a la falta de experiencia en este tipo de cultivos. Se estima que en el futuro la eficiencia global deberá ser de 1.4 %, considerando que mejorará cuando se modifiquen las condiciones de producción en primavera/verano. El análisis se efectúa en condiciones nutricionales constantes.

Para el cálculo de la eficiencia fotosintética se debería medir la radiación que llega a la superficie del medio de cultivo, que está afectada por las características del film de cubierta invernadero y por la irregularidad de la radiación solar debido a las paredes circundantes. Para una estimación más afinada de la energía como compuestos de carbono (Hase et al. 2000), contenida en la biomasa se debería medir el poder calorífico del polvo seco de spirulina con una bomba calorimétrica.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto ING84, "Análisis de procesos de transferencia de calor y materia en procesos agroindustriales. Aplicaciones a la producción de microalgas", FCEIA – UNR. Los autores agradecen especialmente a Patricia Saporiti, gerente de Campo Esmeralda SRL y al Ing. Carlos Saporiti por haber brindado los datos con los cuales se realizó este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chini Zittelli G, Tomasello V, Tredici M., (1996). "Outdoor cultivation of *Spirulina platensis* during autumn and winter in temperate climates". *J. Appl. Phycol.* 8: 293-301.
- Ding-Mei Li, Yu-Zao Qi, (1997). "Spirulina Industry in China: Present status and future prospects". *J. Appl. Phycol* 9: 25-28.
- Falquet J. (1996) "Spiruline, Aspects nutritionnels", *Antenna Technologie*, Genève.
- Fox R.D. (1999) "Spiruline, Technique pratique et promesse", *Edisud*, Aix-en-Provence
- Grossi Gallegos, H, Cartas de irradiación solar global, CD, 1997.
- Hase, R.; Oikawa, H.; Sasa, C; Morita, M.; Watanabe, Y. (2000). Photosynthetic Production of Microalgal Biomass in a Raceway System under Greenhouse Conditions in Sendai City. *Journal Of Bioscience And Bioengineering*. Vol. 89, No. 2, 157-163.
- Medina, M.; Duré, L.; Saporiti, P.; Lara, M (2004). Una experiencia en el cultivo comercial de *Arthrospira Platensis* (Spirulina). *Biotechnology algal. Nuevas perspectivas para Latinoamérica*, pp. 27-30. 1ª Edición. Buenos Aires Proyecto Editorial.
- Medina, M; Gastón A., Abalone, R; Lara, M. , Modelización térmica de estanques para producción de la microalga espirulina (*arthrospira platensis*), *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 7, N° 2, 2003 pág. 8.103.
- Miyamoto, K. (ed.), "Renewable Biological Systems for Alternative Sustainable Energy Production" (Section 1.2.1. Photosynthetic efficiency), *FAO Agricultural Services Bulletin #128* (1997)
- Pazek, T.W. (1997), <http://patzek.berkeley.edu/E11/Photosynthesis.pdf>
- Teruo Higa, James F. Parr, "Beneficial and Effective Microorganisms for a Sustainable Agriculture and Environment" *International Nature Farming Research Center, Atami, Japan* (1994).
- Tredici, M. (2004). Old and new strategies to realize algologists' ultimate goal: 10% solar energy conversion efficiency. *Biotechnology algal. Nuevas perspectivas para Latinoamérica*, pp. 27-30. 1ª Edición. Buenos Aires Proyecto Editorial.
- Walker, D. (1993). *Energy, Plants and Man*. Second Edition. Oxy Graphics, England, Second Edition.

## GLOBAL EFFICIENCY IN SOLAR ENERGY CONVERSION INTO SPIRULINA PRODUCTION FARM BIOMASS

Spirulina (*Arthrospira plantesis*) is microalgae currently used as nutritional supplement in human and animal diets. The objective of this work is to calculate the global efficiency of a spirulina production farm. Global efficiency is defined as the relationship between the received solar radiation and the energy from the dry biomass collected during a sixteenth-month period. The data registered on the farm provides the basis for establishing the monthly efficiency of each production pond. An average global efficiency of 0.4 % is obtained. Possible causes for this low efficiency value are analyzed and ways of improving this average are suggested.

**Key words:** Spirulina farm, production ponds, photosynthetic efficiency.