

## Estudio de la evolución de C: N: Chl en microalgas verdes considerando la irradiación solar a través de un modelo dinámico

### Study of the evolution of C: N: Chl in green microalgae considering solar irradiation through a dynamic model

GUZMÁN-PALOMINO, Abraham†, AGUILERA-VÁZQUEZ, Luciano\*, GARCÍA-VITE, Pedro Martin y MENDOZA-MARTÍNEZ, Ana María

*Instituto Tecnológico de Ciudad Madero / Tecnológico Nacional de México*

ID 1<sup>er</sup> Autor: Abraham, Guzmán-Palomino / ORC ID: 0000-0001-6333-978X, CVU CONACYT ID: 415369

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Luciano, Aguilera-Vázquez / ORC ID: 0000-0001-8095-6528, CVU CONACYT ID: 123018

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Pedro Martin, García-Vite / ORC ID: 0000-0002-4185-5879, CVU CONACYT ID: 227310

ID 3<sup>er</sup> Coautor: Ana María, Mendoza-Martínez / ORC ID: 0000-0003-2592-9230, CVU CONACYT ID: 8374

DOI: 10.35429/JCPE.2019.19.6.13.21

Recibido: 11 de Abril, 2019; Aceptado 30 de Junio, 2019

#### Resumen

Aumentar el aprovechamiento de la irradiación solar por el metabolismo fotosintético de microalgas verdes es necesario para explotar su potencial como fuente de lípidos, carbohidratos, pigmentos o compuestos aromáticos como fuente de biocombustibles o productos de interés. Las microalgas expuestas a la luz solar se adaptan sintetizando una mayor cantidad de pigmento para disipar la energía lumínica incidente, a su vez la sobresaturación de los fotosistemas celulares, pero reducen la eficiencia del uso de la luz. La fotoaclimatación se describe por el contenido en masa de clorofila en relación al contenido de carbono en la biomasa (g Chl/g C). En un fotobiorreactor al aire libre, la irradiancia depende de la geografía, la época del año y de las condiciones atmosféricas. En la presente propuesta, se establece el estudio de la generación de biomasa de microalgas como una función dinámica de la irradiancia y los nutrientes a partir de estequiometría variable representada como C:N:Chl y la asimilación primaria de los nutrientes como nitrato (N) y amonio (A) en G:C. Los resultados de investigación muestran una evolución de G:C, N:C, Chl:C y la biomasa como C (carbono) en diferentes escenarios de parametrización mostrando resultados consistentes.

**Microalgas, Biomasa, Modelado**

#### Abstract

Increasing the use of solar irradiation by the photosynthetic metabolism of green microalgae is necessary to exploit its potential as a source of lipids, carbohydrates, pigments or aromatic compounds as a source of biofuels or products of interest. Microalgae exposed to sunlight are able to adapt by synthesizing a greater amount of pigment to dissipate the incident light energy, controlling the supersaturation of cellular photosystems but reducing the efficiency of the use of light. The photoacclimation is described by the content of chlorophyll mass in relation to the carbon content in the biomass (g Chl / g C). In an outdoor photobioreactor, irradiance depends upon geographical location, time of year and atmospheric conditions. In the present proposal, the generation of biomass is established as a dynamic function of the nutrients, represented as C: N:Chl and the primary assimilation of nutrients as Nitrate (N) and Ammonium (A). The results of this research show an evolution of G: C, N: C, Chl: C and biomass as C (carbon) in different scenarios of parameterization showing consistent results.

**Microalgae, Biomass, Modelling**

**Citación:** GUZMÁN-PALOMINO, Abraham, AGUILERA-VÁZQUEZ, Luciano, GARCÍA-VITE, Pedro Martin y MENDOZA-MARTÍNEZ, Ana María. Estudio de la evolución de C: N: Chl en microalgas verdes considerando la irradiación solar a través de un modelo dinámico. Revista de Energía Química y Física. 2019. 6-19: 13-21

\* Correspondencia del Autor (Correo electrónico: luciano.aguilera@itcm.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Actualmente existe una preocupación derivada del rápido crecimiento de la población mundial y a que los avances en la tecnología han incrementado la demanda energética la cual se proyecta a incrementar en un 50% o más para el año 2030 (Enamala et al., 2018; Raheem, Prinsen, Vuppaladadiyam, Zhao, & Luque, 2018; Shuba & Kifle, 2018).

Las reservas de petróleo no pueden compensar la tasa de consumo actual ya que es 105 veces más rápida de lo que la naturaleza puede proveer. Adicionalmente el uso de los combustibles fósiles produce emisiones de gases de efecto invernadero y la subsecuente acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmosfera lo que produce el calentamiento global. Encontrar nuevas fuentes energéticas que sean tecnológica y económicamente viables es sumamente importante hoy en día (Enamala et al., 2018; Finkel et al., 2010; Rastlavičius, Striūgas, & Felneris, 2018; Shuba & Kifle, 2018).

Una alternativa es el uso de organismos fotosintéticos capaces de aprovechar la luz solar para producir compuestos orgánicos. Entre estos, destacan las microalgas que se han estudiado como fuente de biomasa viable para producir biocombustibles, alimentos, medicamentos entre otros productos de interés comercial (García Vizcaíno, 2018; Gupta, Lee, & Choi, 2015; Kenny & Flynn, 2014, 2017). Además, a través de la fotosíntesis las microalgas reducen las emisiones de dióxido de carbono en la atmosfera (Rizwan, Mujtaba, Memon, Lee, & Rashid, 2018).

La luz es el factor más importante afectando la cinética de la fotosíntesis algal. En general la mayoría de los sistemas de cultivo en masa de las microalgas están limitados por la luz, porque esta es fácilmente absorbida y dispersada por las células de las algas (Jeon, Cho, & Yun, 2005; Lehmuskero, Chauton, & Boström, 2018; Url & Geider, 2012).

Sin embargo, comprender el comportamiento metabólico de las microalgas para producir biomasa es principalmente importante. Es por ello por lo que a continuación se describe más acerca de dicho tema. La composición química de las células de las algas varía con la disponibilidad de nutrientes (Davidson, 1996).

Se ha simulado el metabolismo de diferentes tipos de fitoplancton para relacionar la asimilación de nutrientes con la composición química celular. Es importante utilizar modelos realistas que reflejen el estatus de los nutrientes apropiadamente (K. Flynn & Butler, 2007; Kevin J. Flynn, 2001a, 2001b; Kevin J Flynn, 2013; Lopez Ponte, 2019). Este tipo de modelos desarrollados para múltiples grupos de fitoplancton tiene utilidad potencial en su aplicación para dilucidar información propia del metabolismo intracelular que tiene lugar en los diferentes sistemas de producción de biomasa derivada de microalgas (Kevin J. Flynn, 2001a).

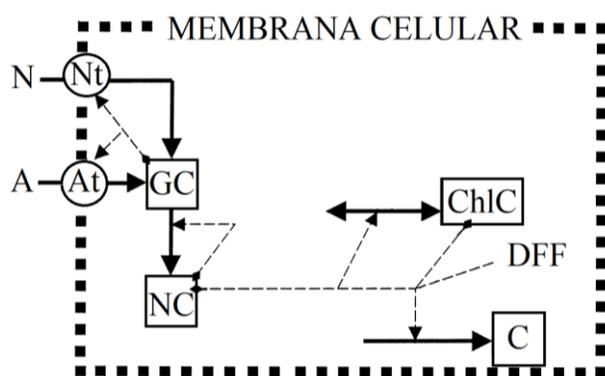
Tradicionalmente, los modelos matemáticos para el crecimiento de algas emplean las ecuaciones de Monod o los modelos de cocientes de Caperon y Droop. (Caperon, 1967). En tales modelos la mayoría de los detalles biológicos son combinados en ecuaciones singulares. Aunque tienen la ventaja de la simplicidad, pero la desventaja de que no pueden manipular interacciones multinutritivas por lo que pueden llegar a tener poca aproximación a la realidad. Una estrategia alternativa es formular modelos con componentes mecanicistas que imiten mucho más de cerca las interacciones fisiológicas de las algas (Kevin J. Flynn, 2001a; García-Camacho, Sánchez-Mirón, Molina-Grima, Camacho-Rubio, & Merchuck, 2012).

El modelo que se seleccione debe reflejar el del sistema objetivo en una amplia gama de factores externos y, por lo tanto, ser de uso más general. Previamente se han descrito modelos mecanicistas individuales para varios aspectos de fisiología de nutrientes en el fitoplancton, como aquellos que describen la interacción el amonio y nitrato, seguidos por descripciones de la aclimatación a la luz y liberación de nitritos y nutrición de fosfato. Los modelos mecanicistas anteriormente mencionados pueden ser modificados para contemplar casos que correspondan a especies y condiciones de luz particulares. Los requerimientos de un escenario en particular dictan el nivel de detalle necesario en el modelo de microalgas a establecer. Las características comunes incluyen el uso generalizado de los procesos de retroalimentación que emplean funciones hiperbólicas y sigmoidales rectangulares normalizadas a los tamaños máximos de las reservas de nutrientes que regulan el transporte de los nutrientes intracelulares (K J Flynn, 1997; Kevin J Flynn, 2013).

El objetivo de este trabajo es estudiar la evolución dinámica de los cocientes de Glutamina- Carbono (G:C), Nitrógeno-Carbono (N:C), Clorofila-Carbono (Chl:C) y el crecimiento de biomasa (C) en microalgas verdes a través de un modelo mecanicista que responda a cambios de la irradiancia (DFF) y disponibilidad de nutrientes como Amonio (A) y Nitrógeno (N) utilizando herramientas de modelado matemático para simular fenómenos como la fotoaclimatación e interacciones multinutriente en dichos organismos. El presente modelo contiene parámetros que pueden estimarse a partir de experimentos o análisis de datos existentes que pueden utilizarse para reproducir escenarios particulares de simulación que precisen significativamente el comportamiento de algas específicos.

El esquema del modelo dado en la Figura 1 contiene cuatro variables de estado describiendo la biomasa (C), los cocientes-C de glutamina (G:C), nitrógeno (N:C), y clorofila (Chl:C). Debido a que todos los cocientes de nutrientes varían no solo con la entrada y salida de nutriente si no también con los cambios en la cantidad de C (debido a la respiración y la fotosíntesis), todas las ecuaciones diferenciales para los cocientes de nutriente en relación al C, incluyen el termino de velocidad específica de crecimiento de Carbono,  $C\mu$  (Kevin J. Flynn, 2001a). Por lo tanto, para los nutrientes como X con cocientes XC (donde XC es la proporción de masa X:C) se tiene que:

$$\frac{d}{dt} \cdot XC = \frac{1}{C} \cdot \frac{d}{dt} \cdot X - C\mu \frac{X}{C} \quad (1)$$



**Figura 1** Esquema de la estructura del modelo dinámico que muestra los principales flujos dentro y fuera de las variables de estado (flechas sólidas y cuadros) de los parámetros externos (nutrientes e irradiancia, DFF). Las variables de estado y los parámetros externos se explican en las Tablas 5 y 6 respectivamente

Fuente: Elaboración propia basada en (Kevin J. Flynn, 2001a)

## Metodología

La metodología empleada para desarrollar el presente trabajo se describe a continuación. El presente modelo ha sido desarrollado a partir de la combinación de componentes simplificados de modelos dinámicos mecanicistas previamente propuestos para simular el crecimiento de fitoplancton como funciones de amonio, nitrato, luz, fierro, silicio, fósforo y temperatura. Como siguiente paso los componentes se modificaron para personalizar la estructura omitiendo secciones que no aplican para el objetivo de estudio. En el presente modelo no se consideran organismos de tipo diatomeas por lo que todas las ecuaciones referentes a el silicio del modelo original se removieron, esto debido a que las diatomeas contienen sílice en su pared celular y las microalgas verdes no.

Así mismo también se omitieron aquellas ecuaciones que hacen referencia al tamaño células debido a que solo se llevaran a cabo simulaciones de la biomasa C, sin dicho efecto. Para esta primera etapa de construcción del modelo, no es necesario incluir una entrada de Hierro (Fe) por lo que también se omitió dentro del modelo. Así mismo, las reservas orgánicas e inorgánicas de fósforo no fueron consideradas. De las simplificaciones anteriores se seleccionaron los parámetros auxiliares y constantes referentes a la descripción de la dinámica de G:C, N:C, Chl:C y la producción de biomasa C en el tiempo que podría ser utilizado en microalgas verdes.

Una vez realizada la simplificación de variables se codificó el modelo en GNU<sup>®</sup> Octave, versión 4.4.1. La resolución numérica del modelo se realizó con función la LSODE (Livermore Solver for ODEs), la cual resuelve explícitamente sistemas stiff y no stiff empleando la matriz Jacobiana (Gallagher & Smith, 2018; Hindmarsh, 1982). Para la representación gráfica de dichas soluciones se utilizó Python<sup>®</sup> 3.7.1. Posteriormente se fijaron distintos escenarios de simulación para observar el comportamiento del modelo las cuales se discuten en el apartado de resultados. La descripción de las ecuaciones utilizadas se muestra a continuación. La descripción de los parámetros y sus valores se puede revisar en la sección de anexos, en las tablas 5, 6, 7 y 8.

El valor máximo del transporte de amonio varia con el estatus del N en las células, y está representado por  $Atq$ . Las pruebas condicionales booleanas (dentro de  $\{ \}$  en las ecuaciones) toman el valor de 1 si es verdadero y 0 si es falso. Ver tablas 5,6 y 7.

$$Atq = \left\{ \frac{1}{NC} > A4 \right\} \cdot Um \cdot A1 \left( 1 - e^{A2 \cdot \left( \frac{1}{NC} - A4 \right)} \right) \cdot e^{A3 \cdot \left( \frac{1}{NC} - A4 \right)} \quad (2)$$

El transporte del amonio ( $At$ ) está limitado por  $Atq$ , que a su vez es una función hiperbólica de la disponibilidad del amonio externo y se representa por la concentración intracelular de un producto temprano de la asimilación inorgánica de nitrógeno ( $GC$ ), usando una función sigmoïdal. Para ello se utilizó la ecuación (3). Ver tablas 5, 6, 7 y 8.

$$At = \left\{ (AmG - GC) > 0 \right\} \cdot Atq \cdot \frac{A}{A + Akt} \cdot \frac{\left( 1 - \frac{GC}{AmG} \right)^4}{\left( 1 - \frac{GC}{AmG} \right)^4 + AhG} \quad (3)$$

Para representar el valor máximo de transporte del nitrato se utilizó la ecuación (4). Ver tablas 5,6 y 7.

$$Ntq = \left\{ \frac{1}{NC} > A4 \right\} \cdot Um \cdot N1 \left( 1 - e^{N2 \cdot \left( \frac{1}{NC} - N4 \right)} \right) \cdot e^{N3 \cdot \left( \frac{1}{NC} - N4 \right)} \quad (4)$$

Las interacciones de corto plazo entre el amonio y el nitrato están controladas por el valor de  $GC$ ;  $GC$  se sintetiza usando las entradas de N de las fuentes inorgánicas de N. Dichas interacciones se plantean en la ecuación (5). Ver tablas 5, 6,7 y 8.

$$Nt = \left( \frac{\{GC < NmG1\} \cdot Ntq \cdot \left( \frac{N}{N+Nkt} \cdot \frac{\left( 1 - \frac{GC}{NmG1} \right)^4}{\left( 1 - \frac{GC}{NmG1} \right)^4 + NhG} \right)}{\left( \frac{\{GC < NmG2\} \cdot 10 \cdot Ntq \cdot \left( \frac{N}{N+200+Nkt} \cdot \frac{\left( 1 - \frac{GC}{NmG2} \right)^4}{\left( 1 - \frac{GC}{NmG2} \right)^4 + NhG} \right)} \right)} \right) \quad (5)$$

El Nitrógeno proveniente de amonio y/o nitrato llevan a cambios en la concentración de glutamina,  $GC$ , que a su vez proporciona una regulación de retroalimentación del transporte. Para esta descripción se utilizó la ecuación (6). Ver tablas 5, 6 y 7.

$$\frac{d}{dt} \cdot GC = At + Nt - 2 \cdot Um \cdot NCm \cdot NCu \cdot \left( 2 - \frac{NC - NC_0}{NCm - NC_0} \right) \cdot \frac{(1 + AAmG) \cdot GC}{GC + AAmG} \cdot CAAs - GC \cdot C\mu \quad (6)$$

El nitrógeno proporcionado por  $GC$ , es utilizado para sintetizar todos los componentes nitrogenados,  $NC$ . La velocidad de síntesis de  $NC$ , es una función hiperbólica de  $GC$ , y está en función del estatus de nitrógeno actual, representado por  $NC\mu$ . La ecuación 7 se utilizó para representar la velocidad de síntesis de  $NC$ . Ver tablas 6, 7 y 8.

$$\frac{d}{dt} \cdot NC = Um \cdot NCm \cdot NC\mu \cdot \left( 2 - \frac{NC - NC_0}{NCm - NC_0} \right) \cdot \frac{(1 + AAmG) \cdot GC}{GC + AAmG} \cdot CAAs - NC \cdot C\mu \quad (7)$$

Para describir la velocidad relativa de crecimiento,  $NC\mu$ , se utilizó la ecuación (8). Ver tablas 5, 6 y 7.

$$NC\mu = \left\{ NCm > NC \right\} \cdot \frac{(NC - NC_0)}{(NC - NC_0) + Nck} \cdot \frac{(NC - NC_0) + Nck}{(NCm - NC_0)} + \left\{ NC \geq NC_0 \right\} \quad (8)$$

La fotoaclimatación se describe por la proporción algal de clorofila con respecto a C-biomasa ( $Chl:C$ ). Para representar los cambios en el contenido de la clorofila representada como se utilizó la ecuación (9). La síntesis de  $ChlC$  está en función del estatus de N (ecuación 8). La síntesis de  $ChlC$  es una función hiperbólica limitada por el máximo valor ( $ChlCm$ ) posible de  $ChlC$ . Ver tablas 5, 6 y 7.

$$\frac{d}{dt} \cdot ChlC = ChlCm \cdot NC\mu \cdot M \cdot Um \cdot CAAs \cdot \left( 1 - \frac{PS}{Pqm} \right) \cdot \frac{\left( 1 - \frac{ChlC}{ChlCm} \right)}{\left( 1 - \frac{ChlC}{ChlCm} \right) + 0.05} - ChlC \cdot (C\mu + (1 - NC\mu)) \cdot Um \quad (9)$$

Para representar la máxima velocidad de fotosíntesis,  $Pqm$ , se utilizó la ecuación (10), la cual está en función de  $NC$ , descrita por  $NC\mu$ . Ver tablas 6, 7 y 8.

$$Pqm = (Um + r_{basal} + Ncm \cdot Um \cdot (redco + 1.5)) \cdot NC\mu \quad (10)$$

Para representar la respiración basal, se utilizó la ecuación (11). La función con  $NC$  asegura que las células cesan su respiración a altos valores  $NC$ . Ver tablas 5, 6 y 7.

$$r_{\text{basal}} = U_m \cdot 0.05 \cdot \frac{1.01 \left( \frac{NC_m - NC}{NC_m - NC_0} \right)}{\left( \frac{NC_m - NC}{NC_m - NC_0} \right) + 0.01} \quad (11)$$

Para representar la disponibilidad de Carbono, CAAs, que controla la síntesis de ChlC en la oscuridad. Se utilizó la ecuación (12). Ver tablas 5, 6 y 7.

$$CAAs = \left\{ \left( \frac{PS}{P_{qm}} + Crva \right) < 1 \right\} \cdot \left( \frac{PS}{P_{qm}} + Crva \right) + \left\{ \left( \frac{PS}{P_{qm}} + Crva \right) \geq 1 \right\} \quad (12)$$

Para representar la reserva de C disponible para los procesos metabólicos en la oscuridad o a muy bajas cantidades de luz cuando la fotosíntesis es inadecuada se utilizó la ecuación (13). Ver tablas 5, 6 y 7.

$$Crva = \frac{\left( 1 - \frac{NC}{C_{res1}} \right)^4}{\left( 1 - \frac{NC}{C_{res1}} \right)^4 + C_{res2}} \quad (13)$$

Para describir la disponibilidad de C para la síntesis de aminoácidos y síntesis de clorofila y la regulación de la reducción de nitrato a amonio se utilizó la ecuación (14). Ver tablas 5, 6 y 7.

$$N_{red} = \left\{ \left( \frac{PS}{P_{qm}} + 0.06 \cdot Crva \right) < 1 \right\} \cdot \left( \frac{PS}{P_{qm}} + 0.06 \cdot Crva \right) + \left\{ \left( \frac{PS}{P_{qm}} + 0.06 \cdot Crva \right) \geq 1 \right\} \quad (14)$$

Para describir la fotosíntesis con los valores actuales de ChlC, Pqm y irradiancia (DFF), se utilizó la ecuación (15). Ver tablas 5, 6 y 7.

$$PS = P_{qm} \cdot \text{TanH} \left( \alpha \cdot DFF \cdot \frac{\text{ChlC}}{P_{qm}} \right) \quad (15)$$

La velocidad específica de crecimiento de C-biomasa representa el balance entre la fotosíntesis y la respiración y para ello se utilizó la ecuación (16). Ver tablas 5, 6 y 7.

$$C_{\mu} = PS - (redco \cdot Nt + (At + Nt) \cdot 1.5 + r_{\text{basal}}) \quad (16)$$

El incremento de C-biomasa esta dado por la ecuación (17). Ver tablas 5 y 6.

$$\frac{d}{dt} \cdot C = C \cdot C_{\mu} \quad (17)$$

## Resultados

Los resultados de esta simulación muestran una evolución de Chl:C, N:C, G:C y C por 24 horas en 3 escenarios de simulación distintos, ver Tabla 1. Los valores de los vectores numéricos obtenidos en la simulación se pueden observar en las tablas 2, 3 y 4, respectivamente.

En el Grafico 1 se puede observar los resultados de la evolución de las variables dinámicas de Chl:C, N:C, G:C y C por 24 horas bajo condiciones saturadas de nutrientes N y A, y de irradiancia. En el Grafico 2 se puede observar los resultados de la evolución de las variables dinámicas de Chl:C, N:C, G:C y C por 24 horas bajo condiciones saturadas de nutrientes N y A, y deficientes de irradiancia. En el Grafico 3 se puede observar los resultados de la evolución de las variables dinámicas de Chl:C, N:C, G:C y C por 24 horas bajo condiciones saturadas de irradiancia, pero limitadas de nutrientes N y A.

## Discusión de los resultados.

En el grafico 1 se observa que debido a que el nitrógeno como amonio (A) y/o nitrógeno (N) de la glutamina es la fuente para la síntesis de todos los otros componentes nitrogenados en la célula, su valor decae a medida que se forman los compuestos nitrogenados y por lo tanto se refleja un aumento desde 0.07 gN/gC hasta 0.1565206 gN/gC en el valor de N:C en un periodo de 24 horas. También se observa que la velocidad de síntesis de N:C es una función hiperbólica de G:C en función del estado actual de N:C en cada unidad de tiempo regulado por NCu. Así mismo se puede notar el decremento en el valor de la clorofila a medida que la biomasa (C) se genera.

En el gráfico 2 se puede observar que el valor de Chl:C en ausencia de irradiancia permanece, esto puede ser debido a que no es utilizada para la producción de biomasa. El decaimiento en la evolución dinámica de la biomasa puede deberse a la ausencia de irradiancia para realizar los procesos fotosintéticos. Así mismo se observa un decaimiento brusco de G:C entre la primera y octava hora, pero después tiende a estabilizarse por el control de retroalimentación. En el gráfico 3 se observa que el incremento de N:C en el tiempo es menor cuando las células son expuestas a concentraciones bajas de nutrientes, a pesar de ello se presenta un leve incremento en el valor de la biomasa hasta 0.0085307 gChl/gC.

GUZMÁN-PALOMINO, Abraham, AGUILERA-VÁZQUEZ, Luciano, GARCÍA-VITE, Pedro Martín y MENDOZA-MARTÍNEZ, Ana María. Estudio de la evolución de C: N: Chl en microalgas verdes considerando la irradiación solar a través de un modelo dinámico. Revista de Energía Química y Física. 2019.

Por otra parte, las interacciones de corto plazo entre la asimilación de N y A están controladas por el valor de G:C; GC se sintetiza así misma usando las entradas de las fuentes de N, provenientes del control de retroalimentación.

Escenario	Parámetros externos		
	N	A	DFP
1	10	10	1000
2	10	10	0
3	1	1	1000

**Tabla 1** Valores de los parámetros externos A, N y DFP colocados en cada escenario de simulación. Ver tabla 8.

Variables	Valor inicial	Valor final	Grafico
GC	0.005	0.0017483	$gNg^{-1}C$
NC	0.07	0.1565206	$gNg^{-1}C$
ChlC	0.09	0.0106285	$gChlg^{-1}C$
C-biomasa	0.01	0.0645372	$\mu gCl^{-1}C$

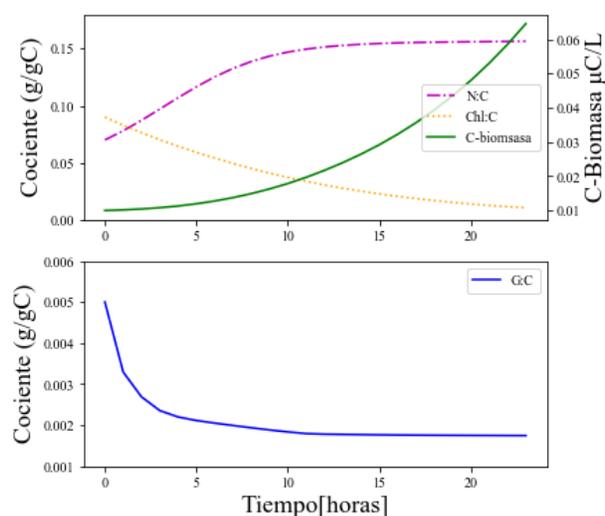
**Tabla 2** Resultados obtenidos de la simulación en el escenario 1 para un periodo de crecimiento de 24 horas.

Variables	Valor inicial	Valor final	Unidad
GC	0.005	0.0073072	$gNg^{-1}C$
NC	0.07	0.1765232	$gNg^{-1}C$
ChlC	0.09	0.0906502	$gChlg^{-1}C$
C-biomasa	0.01	0.0085307	$\mu gCl^{-1}C$

**Tabla 3** Resultados obtenidos de la simulación en el escenario 2 para un periodo de crecimiento de 24 horas.

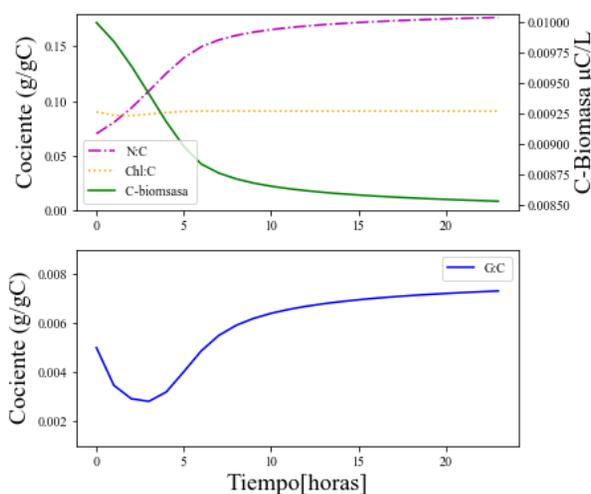
Variables	Valor inicial	Valor final	Unidad
GC	0.005	0.00022903	$gNg^{-1}C$
NC	0.07	0.07867897	$gNg^{-1}C$
ChlC	0.09	0.01097006	$gChlg^{-1}C$
C-biomasa	0.01	0.01984692	$\mu gCl^{-1}C$

**Tabla 4** Resultados obtenidos de la simulación en el escenario 3 para un periodo de crecimiento de 24 horas.



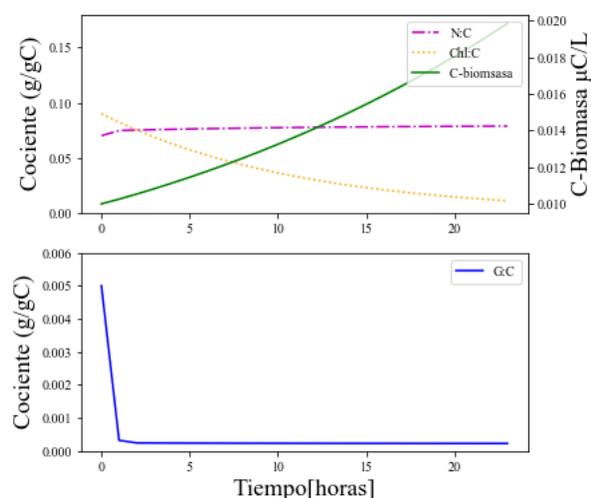
**Gráfico 1** Evolución dinámica de N:C, Chl:C, G:C y C-biomasa bajo el escenario de simulación 1

Fuente: Elaboración propia en Python® 3.7.1



**Gráfico 2** Evolución dinámica de N:C, Chl:C, G:C y C-biomasa bajo el escenario de simulación 2

Fuente: Elaboración propia en Python® 3.7.1.



**Gráfico 3** Evolución dinámica de N:C, Chl:C, G:C y C-biomasa bajo el escenario de simulación 3

Fuente: Elaboración propia en Python® 3.7.1.

## Conclusiones

Se encontró que el modelo mecanicista propuesto puede ser capaz de simular la evolución dinámica de los cocientes de Glutamina- Carbono (G:C), Nitrógeno-Carbono (N:C), Clorofila-Carbono (Chl:C) y el crecimiento de biomasa (C) en microalgas verdes. El modelo responde a cambios de la irradiancia (DFP) y disponibilidad de nutrientes como Amonio (A) y Nitrógeno (N) con las herramientas de modelado matemático utilizadas y muestra coherencia con planteamientos teóricos revisados en la literatura (K. Flynn & Butler, 2007; Kevin J. Flynn, 2001a, 2001b; Kevin J Flynn, 2013).

## Prospectivas

En trabajos futuros se puede acoplar la asimilación y transporte de fósforo (P:C), entre otros parámetros externos. Así mismo también se pueden realizar trabajos de parametrización de las constantes candidatas mostradas en la Tabla 7 para especies de microalgas particulares que conlleven a diseños experimentales que permitan obtener modelos particulares e incrementar la información de condiciones óptimas de obtención de biomasa derivada de sistemas de cultivo de algas para la extracción de diversos metabolitos de interés en nuestra región.

## Anexos

Ec.	Variable de estado	Descripción	Valor Inicial	Unidad
6	GC	Glutamina/Carbón	<AmG	$gNg^{-1}C$
7	NC	Nitrógeno/Carbón	<NCm; NCo	$gNg^{-1}C$
9	ChlC	Clorofila/Carbón	<ChlCm	$gChlg^{-1}C$
17	C	Biomasa	A criterio	$\mu gCl^{-1}C$

**Tabla 5** Variables de estado y valores iniciales. Fuente: (Kevin J. Flynn, 2001a)

Auxiliar	Descripción	Unidad
At	Velocidad de transporte del amonio	$gNg^{-1}Cd^{-1}$
Atq	Transporte máximo posible de amonio a un dado NC	$gNg^{-1}Cd^{-1}$
r <sub>basal</sub>	Respiración basal	$gCg^{-1}Cd^{-1}$
CAAs	Disponibilidad de (C) para la asimilación de (N) en oscuridad	Ad
Crva	Reserva disponible de (C), 0 si es mínimo, 1 si es máximo.	Ad
C <sub>μ</sub>	Velocidad específica de crecimiento del cociente (C).	$gCg^{-1}Cd^{-1}$
NCu	N:C normalizado; 0 si es mínimo y 1 si es máximo.	Ad
Nred	Disponibilidad normalizada de (C), para la reducción de nitrato en oscuridad; 0 si es mínimo y 1 si es máximo.	Ad
Nt	Velocidad de transporte del nitrato	$gNg^{-1}Cd^{-1}$
Ntq	Velocidad máxima de transporte de nitrato a NC actual.	$gNg^{-1}Cd^{-1}$
PS	Velocidad de fotosíntesis	$gCg^{-1}Cd^{-1}$

**Tabla 6** Variables auxiliares. Ad, adimensional Fuente: (Kevin J. Flynn, 2001a)

Constante	Definición	valor	Unidad
A1	Constante que relaciona N:C y At	-0.705	$gNg^{-1}C$
A2	Constante que relaciona N:C y At	0.982	Ad
A3	Constante que relaciona N:C y At	-1.061	Ad
A4	Constante que relaciona N:C y At; el mínimo C:N para el transporte de amonio.	5.34	$gCg^{-1}N$
AAmG	Constante de saturación media para la síntesis de AAs de la glutamina	0.001	$gNg^{-1}C$
AhG	Constante para la supresión del transporte de amonio por GC	0.1	Ad
Akt	Constante de saturación media para el transporte de amonio	14	$\mu gNl^{-1}$
$\alpha^*$		$8 \times 10^{-6}$	$(m^{-2}g^{-1}Chla)(gCm)$
AmG	Tamaño de la piscina de glutamina que para el transporte de amonio	0.01	$gNg^{-1}C$
ChlCm*	Contenido máximo de Chl:C	0.09	
Cres1	Constante para computar reserva de C; valor de N:C cuando Crva es 0.	0.2	$gNg^{-1}C$
Cres2	Constante para computar reserva de C	0.01	Ad
M	Escalar para optimizar fotoaclimatación	2	Ad
N1	Constante que relaciona N:C y Nt	-0.2907	$gNg^{-1}C$
N2	Constante que relaciona N:C y Nt	1.7644	Ad
N3	Constante que relaciona N:C y Nt	-1.9282	Ad
N4	Constante que relaciona N:C y Nt	5.47	$gCg^{-1}N$
Nck*	Constante para el control de N del C-crecimiento específico	1	$gNg^{-1}C$
NCm*	Máximo N:C bajo crecimiento balanceado	0.15	$gNg^{-1}C$
NhG	Constante para la supresión del transporte de N por la glutamina	0.05	Ad
Nkt	Constante de saturación media para el transportador de nitrato 1; valor para el transportador 2 es 200 veces este valor.	14	$\mu gNl^{-1}C$
NmG1	Tamaño de la piscina de glutamina que detiene el transporte de nitrato a través del transportador 1	0.003	$gNg^{-1}C$
NmG2	Tamaño de la piscina de glutamina que detiene el transporte de nitrato a través del transportador 2	0.006	$gNg^{-1}C$
redco	Respiración de Carbono de apoyo para la reducción de nitrato a amonio.	1.71	$gCg^{-1}N$
Um*	Máxima velocidad de crecimiento	1	$gCg^{-1}Cd^{-1}$

**Tabla 7** Constantes; aquellas marcadas \* son candidatas para parametrización. Ad, adimensional Fuente: (Kevin J. Flynn, 2001a)

Parámetro	Descripción	Unidad
A	Amonio	$\mu\text{gNl}^{-1}$
N	Nitrato	$\mu\text{gNl}^{-1}$
DFP	Densidad de flujo de fotones	$\mu\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$

**Tabla 8** Parámetros externos. *Fuente:* (Kevin J. Flynn, 2001a)

## Agradecimiento

Se agradece al Tecnológico de Ciudad Madero por todos los apoyos y servicios prestados por mis profesores para la realización de este trabajo. Así mismo a CONACYT por la beca otorgada durante mis estudios de doctorado.

## Referencias

- Caperon, J. (1967). Population Growth in Micro-Organisms Limited by Food Supply. *Ecology*, 48(5), 715–722. <https://doi.org/10.2307/1933728>
- Davidson, K. (1996). Modelling microbial food webs. *Marine Ecology Progress Series*, 145(1–3), 279–296. <https://doi.org/10.3354/meps145279>
- Enamala, M. K., Enamala, S., Chavali, M., Donepudi, J., Yadavalli, R., Kolapalli, B., ... Kuppam, C. (2018). Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 49–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.012>
- Finkel, Z. V., Beardall, J., Flynn, K. J., Quigg, A., Rees, T. A. V., & Raven, J. A. (2010). Phytoplankton in a changing world: Cell size and elemental stoichiometry. *Journal of Plankton Research*, 32(1), 119–137. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp098>
- Flynn, K., & Butler, I. (2007). Nitrogen sources for the growth of marine microalgae: role of dissolved free amino acids. *Marine Ecology Progress Series*, 34(December 1986), 281–304. <https://doi.org/10.3354/meps034281>
- Flynn, K J. (1997). Modelling the interactions between ammonium and nitrate. *Philosophical Transactions B*, 352.
- Flynn, Kevin J. (2001a). A mechanistic model for describing dynamic multi-nutrient, light, temperature interactions in phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 23, 977–997. Retrieved from <http://www.swan.ac.uk/biosci/>
- Flynn, Kevin J. (2001b). Temperature Interactions in Phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 23(9), 977–997. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.10.005>
- Flynn, Kevin J. (2013). Do we need complex mechanistic models for photoacclimation phytoplankton?, 48(6), 2243–2249.
- Gallagher, M. T., & Smith, D. J. (2018). Meshfree and efficient modeling of swimming cells. *Physical Review Fluids*, 3(5), 1–16. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.053101>
- García-Camacho, F., Sánchez-Mirón, A., Molina-Grima, E., Camacho-Rubio, F., & Merchuck, J. C. (2012). A mechanistic model of photosynthesis in microalgae including photoacclimation dynamics. *Journal of Theoretical Biology*, 304, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.JTBI.2012.03.021>
- García Vizcaíno, L. (2018). *Purificación y Caracterización fisicoquímica de proteínas procedentes de microalgas marinas. Aplicación como colorante*. Universidad de Jaén: Escuela Politécnica Superior de Linares.
- Gupta, P. L., Lee, S.-M., & Choi, H.-J. (2015). A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(9), 1409–1417. <https://doi.org/10.1007/s11274-015-1892-4>
- Hindmarsh, A. C. (1982). *Toward a Systematized Collection of Ode Solvers*.
- Jeon, Y. C., Cho, C. W., & Yun, Y. S. (2005). Measurement of microalgal photosynthetic activity depending on light intensity and quality. *Biochemical Engineering Journal*, 27(2), 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.08.017>
- Kenny, P., & Flynn, K. J. (2014). In silico optimization for production of biomass and biofuel feedstocks from microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 27(1), 33–48. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0342-2>

Kenny, P., & Flynn, K. J. (2017). Physiology limits commercially viable photoautotrophic production of microalgal biofuels. *Journal of Applied Phycology*, 29(6), 2713–2727. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1214-3>

Lehmuskero, A., Chauton, M. S., & Boström, T. (2018). Light and photosynthetic microalgae: A review of cellular- and molecular-scale optical processes. *Progress in Oceanography*. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.09.002>

Lopez Ponte, W. M. (2019). *Evaluación de dos especies de microalgas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes de aguas residuales de la PTAR taboada del callao, Perú*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Raheem, A., Prinsen, P., Vuppaladadiyam, A. K., Zhao, M., & Luque, R. (2018). A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments. *Journal of Cleaner Production*, 181, 42–59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.125>

Raslavičius, L., Striūgas, N., & Felneris, M. (2018). New insights into algae factories of the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(September 2016), 643–654. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.024>

Rizwan, M., Mujtaba, G., Memon, S. A., Lee, K., & Rashid, N. (2018). Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(March 2017), 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.034>

Shuba, E. S., & Kifle, D. (2018). Microalgae to biofuels: ‘Promising’ alternative and renewable energy, review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(April 2016), 743–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.042>

Url, S., & Geider, J. (2012). Light and Temperature Dependence of the Carbon to Chlorophyll a Ratio in Microalgae and Cyanobacteria : Implications for Physiology and Growth of Phytoplankton Author ( s ): Richard J . Geider Reviewed work ( s ): DEPENDENCE OF LIGHT AND TEMPERATURE a RAT. *Growth (Lakeland)*, 106(1), 1–34.