

Revista Latinoamericana de Difusión Científica

Volumen 6 – Número 10

Depósito Legal ZU2019000058 - ISSN 2711-0494

Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 6 - Número 10

Enero – Junio 2024

Maracaibo – Venezuela

Propuesta de modelo conceptual de crecimiento y producción de Saxitoxina por *Planktothrix Agardhii* y su presencia en la Laguna de Zumpango, Estado de México

DOI: <https://doi.org/10.38186/difcie.610.02>

Víctor Manuel Luna Pabello*

Luis Antonio Rodríguez Guerrero**

Luciano Hernández Gómez***

Pedro Alejandro de Jesús Magaña Melgoza****

RESUMEN

La presencia de florecimientos de cianobacterias productoras de saxitoxina (STX) en cuerpos epicontinentales eutrofizados constituye un riesgo tanto para la salud humana, como para la biota asociada al mismo. La Laguna de Zumpango es un cuerpo acuático importante para el Valle de México en la cual se ha observado la presencia de *Planktothrix* y STX. El objetivo de este trabajo fue proponer un modelo conceptual de crecimiento y producción de STX por *Planktothrix agardhii*, que permita prevenir un escenario de producción de altas cantidades de STX en la Laguna de Zumpango. El modelo propuesto se elaboró a partir del desarrollo del marco conceptual; la abstracción y descripción formal del sistema de interés; la aplicación del análisis de sistemas y la representación diagramática del modelo. De acuerdo con el análisis de la información bibliográfica, un posible escenario en el que puede ocurrir la producción de STX que representaría un riesgo para la salud humana o para las especies acuáticas presentes, es durante la temporada de lluvias y el inicio de temporada de frío, con baja presencia de nitratos, densidad promedio de flujo fotones $100 \mu_{\text{fotones}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y cuando los florecimientos de cianobacterias tengan presente a *P. agardhii*.

PALABRAS CLAVE: Degradación ambiental, calidad del agua, eutroficación, toxicología, Laguna de Zumpango.

*Profesor, Investigador y Jefe del Laboratorio de Microbiología Experimental. Coordinador General del Grupo Académico Interdisciplinario Ambiental (GAIA). Departamento de Biología, Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8651-0295>. E-mail: lpvictor@unam.mx

**Estudiante de la Maestría en Ciencias Bioquímicas, Posgrado en Ciencias Bioquímicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Ciudad de México, México. E-mail: rodríguez_luis@live.com.mx

***Técnico Académico de Tiempo completo. Laboratorio de Microbiología Experimental. Departamento de Biología, Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Ciudad de México, México. E-mail: lhergom@yahoo.com.mx

****Técnico Académico de Tiempo completo. Coordinación de Ingeniería Ambiental. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Ciudad de México, México. E-mail: pmaganam@ingen.unam.mx

Recibido: 12/09/2023

Aceptado: 08/11/2023

A Conceptual Model Proposal on the Growth and Production of *Saxitoxin* by *Planktothrix Agardhii*, and its Presence in Lake Zumpango, State of Mexico

ABSTRACT

The presence of blooms of saxitoxin-producing cyanobacteria (STX) in eutrophic epicontinental bodies constitutes a risk both for human health and for the biota associated with it. Lake Zumpango represents a very important waterbody for the Valley of Mexico in which the presence of *Planktothrix* and STX has been observed. The objective of this work was to propose a conceptual model of growth and production of STX by *Planktothrix agardhii*, which allows preventing a production scenario of high amounts of STX in the Lake Zumpango. The proposed model was developed based on the development of the conceptual framework; the abstraction and formal description of the system of interest; the application of systems analysis and the diagrammatic representation of the model. Based on the analysis of bibliographic information, during the rainy season, and at the beginning of the cold season there might be a potentially health-risk scenario for humans or aquatic species due to the concentration of STX, combined with a low presence of nitrates, an average photon flux density of $100 \mu_{\text{photons}} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, and when cyanobacteria blooms have *P. agardhii* present.

KEYWORDS: Environmental degradation, Water quality, Eutrophication, Toxicology, Lake Zumpango.

Introducción

El aumento de las descargas de aguas contaminadas con alto contenido de nitrógeno y fósforo, hacia los cuerpos de agua de los sistemas lénticos epicontinentales, provoca en muchos casos su eutrofización. Un efecto derivado de dicho fenómeno es el incremento en la ocurrencia de florecimientos de cianobacterias con producción de saxitoxina (SXT) (De León, 2002). La SXT es un potente alcaloide neurotóxico, que contiene un esqueleto tricíclico de 3,4-propinoperhidropurina ($\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{N}_7\text{O}_4$), con un peso molecular de 299.29 UMA (Wiese, D'Agostino, Mihali, Michelle & Neila (2010); Li *et al.*, 2016). Forma parte de las toxinas paralizantes de mariscos (PST), dentro de las cuáles es el análogo más potente. La SXT es producida en ecosistemas de agua epicontinental por cianobacterias de los géneros *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Raphidiopsis*, *Planktothrix* y *Scytonema* (Pearson, Dittmann, Mazmouz, Ongley, D'Agostino & Neilan,

2016). Los florecimientos de cianobacterias productoras de SXT han sido reportados en reservorios de agua epicontinentales alrededor de todo el mundo, con excepción de la Antártida (Hambricht, Zamor, Easton & Allison, 2014). A nivel mundial *Planktothrix* sp., es reconocido como productor potencial de Anatoxina, Microcystina y STX, con una abundancia celular media de 2.8×10^3 células mL⁻¹ y Máximo 8.6×10^4 células mL⁻¹ en lagos de Estados Unidos (Loftin, Graham, Hilborn, Lehmann, Meyer, Dietze & Griffith, 2016). Los florecimientos de cianobacterias constituyen una posible fuente de intoxicación al llegar a entrar en contacto directo con el ser humano, ya sea a través de los reservorios de agua que sirven para abastecer el consumo humano o en la realización de sus actividades diarias (EPA, 2019). Asimismo, pueden llegar a producir intoxicación en organismos acuáticos (plantas y animales) que entren en contacto con dichos florecimientos, o bien, que los lleguen a consumir (ANZFA, 2001; Berry & Lind 2010; Corbel, Mougin & Bovaida, 2013). De manera particular, para el Valle de México, la Laguna de Zumpango constituye un cuerpo de agua importante. Actualmente, se realizan actividades turísticas y de pesca, lo que repercute en un beneficio económico para sus habitantes. Sin embargo, se han encontrado reportes que indican la presencia de cianobacterias productoras de microcistina (Vasconcelos, Martins, Vale, Antunes, Azevedo, Walker, Lopez, & Montejano, 2010), lo cual pudiera verse incrementado por la recepción de descargas de aguas residuales a la laguna. Por tal motivo, este trabajo se enfocó en proponer un modelo conceptual de crecimiento y producción de STX por *Planktothrix agardhii*, que permita prevenir aún con pocos datos, la posible presencia de un escenario en que pudiera ocurrir la producción en altas cantidades de dicha toxina en la Laguna de Zumpango, Estado de México, México.

1. Aspectos Metodológicos

El procedimiento para generar el modelo conceptual propuesto se elaboró considerando lo indicado por Grant et al. (2001). Para ello, se partió de fijar los objetivos del modelo, consultó y organizó la información científica disponible en literatura especializada sobre el tema. Posteriormente, se desarrolló el marco conceptual y se procedió a la abstracción mediante el uso de símbolos escritos que indican la naturaleza específica de cada relación. Como siguiente paso, se realizó la descripción formal de los componentes del sistema y el análisis de los procesos interconectados caracterizados por

V. M. Luna Pabello et al// Propuesta de modelo conceptual de crecimiento y producción... 8-28
 diversas vías recíprocas de causa efecto. Finalmente, efectuó la definición de los límites del sistema y se realizó la representación diagramática del modelo conceptual.

2. Florecimientos de cianobacterias

Los florecimientos de cianobacterias, conocidos también como “blooms”, son eventos de multiplicación y acumulación de una o dos especies de cianobacterias en períodos de horas a días, rebasando una densidad celular de 1×10^6 células L^{-1} . Son fenómenos naturales que ocurren ante determinadas condiciones ambientales asociados al incremento de las condiciones de eutrofización de los cuerpos de agua (Aguilera & Echenique, 2011). Los factores que favorecen el desarrollo de florecimientos de *P. agardhii*, así como sus efectos, se resumen en la Figura 1. De manera particular, el género *Planktothrix*, debe su nombre precisamente a la capacidad de sus miembros para formar florecimientos planctónicos en ecosistemas de agua dulce (Scheffer, Rinaldi, Gragnani, Mur, & Van Nes, 1997, Komárek & Anagnostidis, 2005).

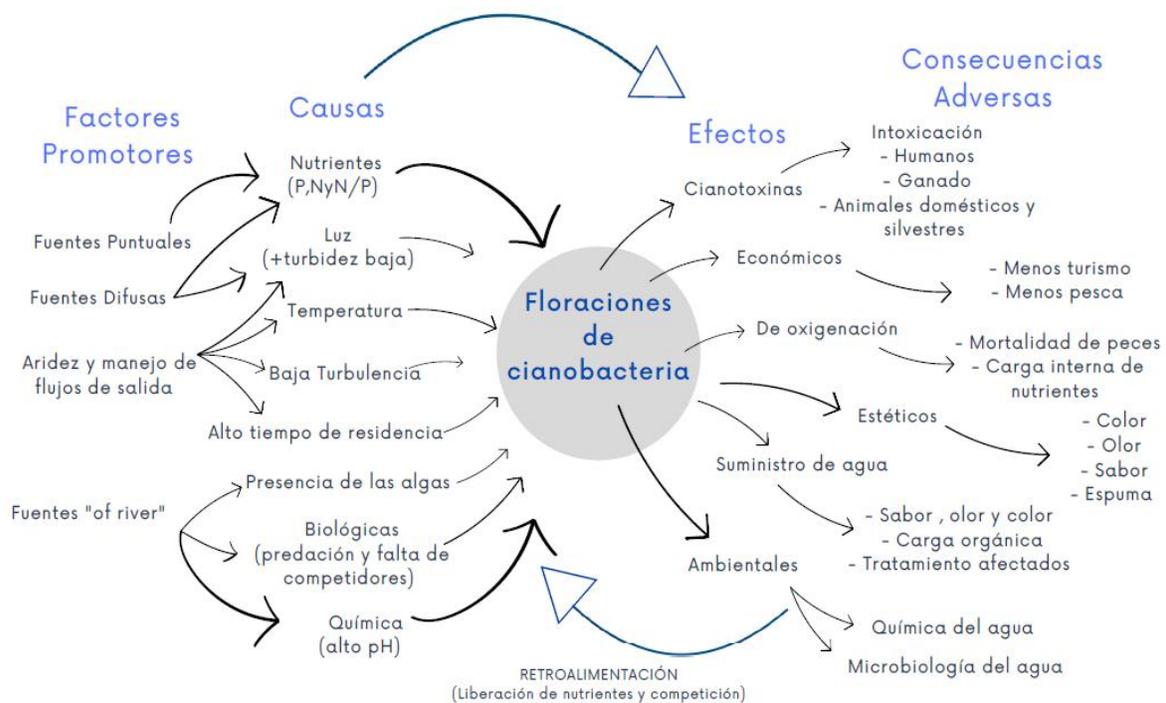


Figura 1. Diagrama simplificado de los factores que determinan las causas de los florecimientos de cianobacterias y los efectos de éstas sobre los sistemas acuáticos, su biota y sus potenciales usos (Modificado de: De León, 2002).

Con respecto a los nutrientes *P. agardhii*, requiere de aproximadamente 20 elementos químicos para la formación de nuevas células, algunos de ellos en grandes cantidades (C, H, O y N) y otros en cantidades pequeñas (P, S, K, Na, Ca, Mg y Cl) o en trazas (Si, Fe, Mn, Mo, Cu, Co y Zn). Debido a que *P. agardhii* obtiene los requerimientos necesarios de carbón de la atmósfera, este no es el elemento limitante en su crecimiento, mientras que los altos requerimientos de fosfato (PO_4^{3-}) y de nitrato (NO_3^-) por parte de las células vegetativas hacen al fósforo y nitrógeno los principales elementos limitantes de la producción en sistemas acuáticos continentales. De acuerdo con Redfield (1958) debe existir una proporción molar de nitrógeno: fósforo (N: P) de 16N:1P, por lo que el control de estos compuestos hace posible la disminución de los florecimientos y hasta la desaparición del fenómeno (Rosso & Giannuzzi, 2011; Pawlik-Skowonska, Kalinowska, & Skoronoski, 2013; Boopathi & Ki, 2014; Casero, Ballot, Agha, Quesada & Cires, 2014). El incremento de nutrientes en el ambiente, ha llevado a formar inclusiones intracelulares de gránulos de polifosfatos, glicógeno y cianoficinas, como reserva de nutrientes (Rosso & Giannuzzi, 2011).

El incremento de la intensidad luminosa y la duración del periodo de luz solar durante el día, es otro factor determinante, ya que inciden directamente sobre el metabolismo de las cianobacterias autótrofas, de modo que al aumentar la intensidad luminosa también aumenta la actividad fotosintética y la demanda de nutrientes. Cuando la floración se acumula en la superficie de la columna de agua, se produce un ensombrecimiento sobre el resto de las especies dispersas en los niveles inferiores y con ello una limitación de su crecimiento. Sin embargo, *P. agardhii* al poseer vacuolas de gas que regulan su posición en la columna de agua logran permanecer en las capas superiores iluminadas donde pueden desarrollar florecimientos (Cirés & Quesada, 2016). Muchas cianobacterias, entre ellas *P. agardhii*, son sensibles a altas intensidades de luz durante largos periodos de tiempo, con un límite de crecimiento a una densidad de flujo de fotones de $320 \mu_{\text{fotones}} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Kim Tiam, Comte, Dalle, Delagrangé, Djediat, Ducos, Duval, Feilke, Hamlaoui, Le Manach, Setif, Yépreman, Marie, Kirilovsky, Gugger & Bernard, 2022; Lee, 2008; Rosso & Giannuzzi, 2011).

El aumento de la temperatura del agua superior a 20°C favorece el desarrollo de *P. agardhii*, ya que incrementa su tasa de crecimiento y de reproducción celular. En medios

de cultivo, el máximo de crecimiento se produce generalmente en el intervalo de temperatura entre 25 y 30°C (Rosso & Giannuzzi, 2011; Casero *et al.*, 2014). Los sistemas acuáticos con tiempo de residencia hidráulicos, mayores a 10 días, favorecen el desarrollo de la floración por *P. agardhii*, siendo causa directa de la estratificación de la columna de agua; el incremento en la tasa de sedimentación de las partículas; el aumento de la transparencia y la acumulación de las cianobacterias en la superficie (Rosso & Giannuzzi, 2011). Mientras que la ausencia de viento o baja turbulencia, con velocidad del viento menor a 3 m min⁻¹, determina un aumento en la transparencia del agua, debido a que de esa forma se contribuye al proceso de sedimentación de las partículas, el agotamiento de los nutrientes y la acumulación de la floración de cianobacterias en la superficie (De León 2002; Li *et al.*, 2016).

3. Factores ambientales en la producción de STX por *P. agardhii*

Se ha observado que los factores ambientales, que impactan en la biosíntesis de la STX en *P. agardhii* son: nutrientes, densidad de flujo de fotones, temperatura y concentración de sal (Boopathi & Ki, 2014). En este sentido, el agotamiento de nitratos en relación a la influencia de fósforo (0N:1P), influye en la producción de STX, incrementando su producción cerca del doble comparada con una relación distinta (Smith 1990; Días *et al.*, 2002; Casero *et al.*, 2014). No obstante, una relación de 200 NO₃ :1 PO₄, incrementa el crecimiento celular y la producción de STX del cultivo (Casero *et al.*, 2014). La producción de STX ha sido registrada a una densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos de 100 μ_{fotones} m⁻²s⁻¹. Al respecto, Kellmann & Neilan (2007) reportaron que “*in vitro*” la síntesis de la STX es luz-dependiente y que se reduce su producción en la oscuridad.

Por otra parte, se han observado resultados contradictorios en relación al incremento de temperatura y la producción de STX. Por ejemplo, al comparar cultivos a 25°C con los realizados a 15°C, la producción de STX por célula resultó mayor a menor temperatura (Casero *et al.*, 2014). Sin embargo, a una temperatura mayor a 28°C, se ha reportado que se induce el crecimiento celular y la producción de STX más que a una temperatura de cultivo de 25°C (Dias *et al.*, 2002; Casero *et al.*, 2014; Pearson *et al.*, 2016).

En cuanto a la presencia de NaCl extracelular, estudios realizados por Soto-Liebe *et al.* (2012) han evidenciado que su presencia incrementa la producción de STX en un medio

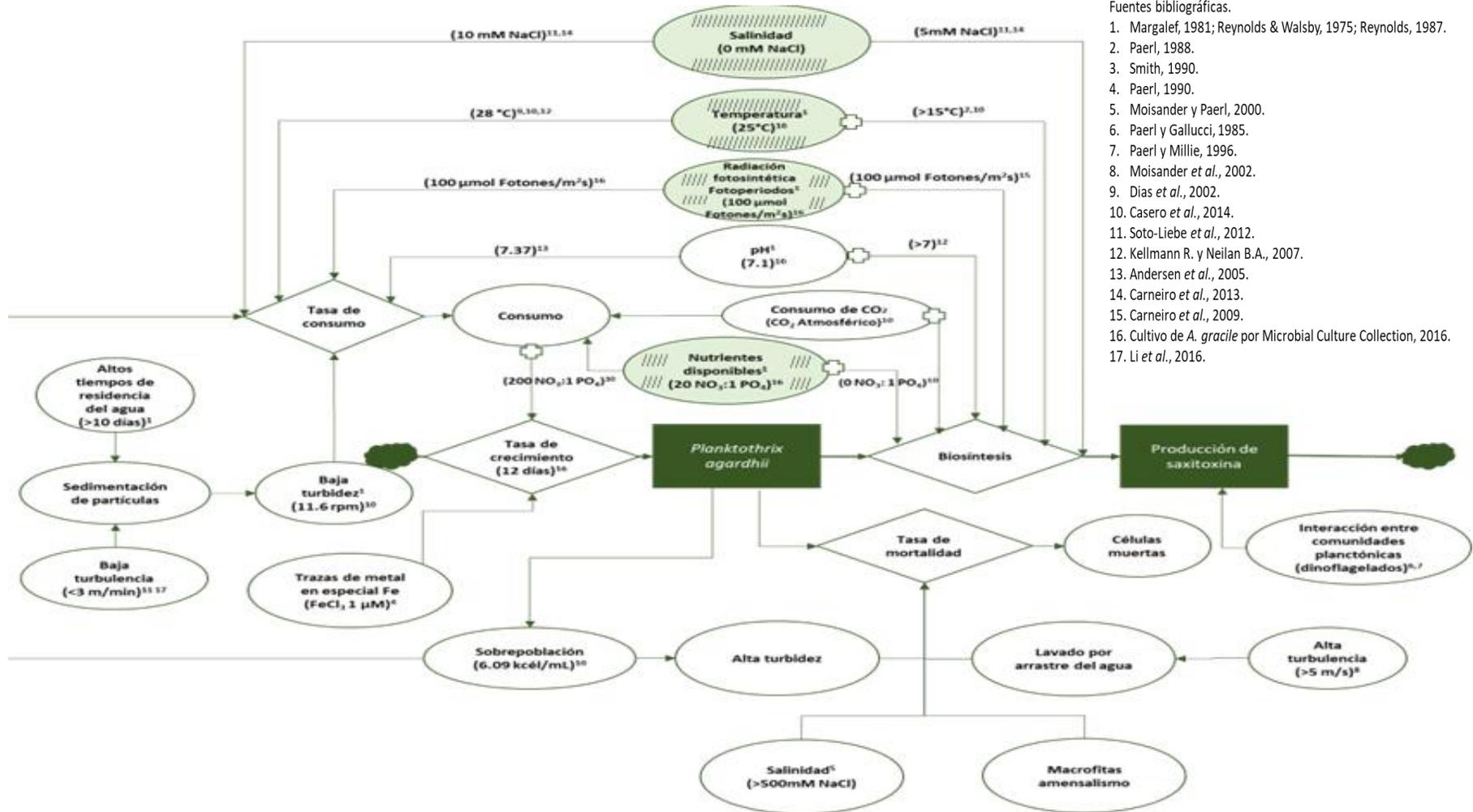
V. M. Luna Pabello et al// Propuesta de modelo conceptual de crecimiento y producción... 8-28
con una concentración de NaCl entre 5 mM y 10 mM. Dichos estudios sugieren que la producción de STX podría tener impacto en los canales de sodio de la célula.

4. Presencia de STX en cuerpos de agua dulce

Las toxinas de agua dulce que se encuentran con más frecuencia son las microcistinas, las cuales son producidas por varias especies de cianobacterias que forman florecimientos, de las cuales las más importantes son *Microcystis*, *Planktothrix*, *Anabaena*, *Anabaenopsis* y *Aphanizomenon* (Tabla1). De manera particular, los géneros, *Microcystis* y *Planktothrix*, se distribuyen a nivel mundial, por lo cual pueden formar florecimientos en lagos y embalses ubicados en distintas partes del mundo. En agua dulce, la principal preocupación por intoxicación con microcistina se debe a la posible ingestión de agua potable contaminada, el contacto recreativo y la intoxicación por consumo de animales que la contengan (Backer, Manassaram-Baptiste, Leprell & Botton, 2015; Ibelings, Backer, Kardinaal & Chorus, 2015). Se sabe que estas hepatotoxinas son químicamente estables tanto en el agua dulce como en la marina, persisten en los sedimentos, se acumulan en los dosificadores de agua dulce y marina y se transfieren a la cadena alimentaria por bioacumulación (Churro, Azevedo, Vasconcelos & Silva, 2017; Zamora-Barrios, Nandini, & Sarma, 2019). Se ha establecido que la síntesis de microcistina requiere de altos niveles de nitrógeno, específicamente el elevado contenido de nitrógeno exógeno promueve altas cuotas celulares de microcistinas en cianobacterias (Chaffin, Davis, Suith & Baer, 2018); Lee *et al.*, 2008). También se ha reportado que cocientes bajos de N:P (< 23) tienen un amplio potencial para la producción de microcistina. De manera particular, *Planktothrix* almacena nitrógeno intracelularmente como cianoficina (un co-polímero de aspartato y arginina) o ficocianina (Van de Waal, Ferrerueta, Tonk Van Donk, Huisman, Visser & Matthijs, 2010). Esta característica le da a *Planktothrix*, bajo condiciones limitantes de N, ventaja para sobrevivir, respecto de las algas eucarióticas, aún si estas pueden fijar nitrógeno atmosférico.

Tabla I. Producción de saxitoxina por especies de cianobacterias presentes en México

Especie	Presencia en México			Producción de saxitoxina por la especie		
	Lugar	Concentración celular (Células L ⁻¹)	Referencia	Concentración celular (fg _{STX} cél ⁻¹)	Condiciones de cultivo	Referencia
<i>Aphanizomenon gracile</i>	Lago de Pátzcuaro, Michocán de Ocampo Laguna de Zumpango & Valle de Bravo, Edo Méx.	1x10 ⁶	Tomasini-Ortiz <i>et al.</i> , 2012. Vasconcelos <i>et al.</i> , 2010	10.9	77 NO ₃ : 1 PO ₄ 100 μmol _{fotón} m ⁻² s ⁻¹ 20°C 12 hL:12 hO	Casero <i>et al.</i> , 2014
<i>Anabaena circinales</i>	Laguna de Zumpango & Valle de Bravo, Edo. Méx.	1x10 ⁶	Vasconcelos <i>et al.</i> , 2010	10.6	77 NO ₃ : 1 PO ₄ 100 μmol _{fotón} m ⁻² s ⁻¹ 20°C 12 hL:12 hO	Velzeboer <i>et al.</i> , 2001
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Lago de Catemaco, Veracruz	No se especifica	Berry & Lind, 2010.	0.39	77 NO ₃ : 1 PO ₄ 100 μmol _{fotón} m ⁻² s ⁻¹ 20°C 12 hL:12 hO	Carneiro <i>et al.</i> , 2009
<i>Planktothrix agardhii</i>	Laguna de Zumpango & Valle de Bravo, Edo Méx. Ejido de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, Cd. Mx.	1x10 ⁶	Vasconcelos <i>et al.</i> , 2010. Figueroa-Torres <i>et al.</i> 2015.	10.2	77 NO ₃ : 1 PO ₄ 100 μmol _{fotón} m ⁻² s ⁻¹ 20°C 12 hL:12 hO	Pomati <i>et al.</i> , 2000



Fuentes bibliográficas.

1. Margalef, 1981; Reynolds & Walsby, 1975; Reynolds, 1987.
2. Paerl, 1988.
3. Smith, 1990.
4. Paerl, 1990.
5. Moisaner y Paerl, 2000.
6. Paerl y Gallucci, 1985.
7. Paerl y Millie, 1996.
8. Moisaner *et al.*, 2002.
9. Dias *et al.*, 2002.
10. Casero *et al.*, 2014.
11. Soto-Liebe *et al.*, 2012.
12. Kellmann R. y Neilan B.A., 2007.
13. Andersen *et al.*, 2005.
14. Carneiro *et al.*, 2013.
15. Carneiro *et al.*, 2009.
16. Cultivo de *A. gracile* por Microbial Culture Collection, 2016.
17. Li *et al.*, 2016.

Figura 2. Modelo conceptual de los factores que intervienen en el crecimiento de *P. agardhii* y la producción de STX, entre paréntesis se observan los valores que inducen al crecimiento celular o la producción de STX y remarcado con líneas (//////) se observan los principales factores de estrés en la producción de STX

Adicionalmente, el género *Planktothrix* resulta importante debido a su potencial para producir tanto STX como microcistina (Fournier, Riehle, Dietrich & Schleheck, 2021; Vela, Sevilla, Martin, Pellicer, Bes, Fillat, & Peleato, 2007). Se sabe que las cepas de *Planktothrix* formadoras de florecimientos en agua, de las especies *P. agardhii* y *P. rubescens*, producen diversos metabolitos peptídicos secundarios tóxicos o bioactivos. Además, muchas cepas de *Planktothrix* producen microcistinas y hepatotoxinas cianobacterianas, que se consideran un riesgo para la salud pública. En algunos estados de la Unión Americana, se ha establecido en 3 µg/L para STX el valor para toxicidad recreacional (Graham, Loftin & Kamman, 2009; Chorus, 2012). Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido como valor guía provisional 1 µg/L de microcistina en agua potable (Chorus & Bertram 1999).

En los cuerpos de agua dulce lénticos de la zona central de México se han reportado florecimientos con concentraciones medias anuales que rebasan 1 X 10⁶ células mL⁻¹, dentro de la cual se han registrado cuatro géneros productores de STX: *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis* y *Planktothrix* (Vasconcelos et al., 2010), y entre estas la especie *P. agardhii* considerada de mayor distribución en cuerpos de aguas eutróficos (Komárek & Komárková-Legnerová, 2002). Dado que el contenido de microcistina en los florecimientos de *Planktothrix* es generalmente mayor que el de los florecimientos de *Microcystis*, la detección e identificación de estas cianobacterias toxigénicas es importante para la evaluación y gestión del riesgo (Gaget, Welker & Rippka, 2015); Zastepa et al., 2021). De manera particular, *P. agardhii* es una especie productora de (STX) que pertenecen a las toxinas paralizantes de los mariscos (PST) la cual es una de las neurotoxinas naturales más potentes (Gad, 2014; Kellmann et al., 2008). Una dosis de aproximadamente 1 mg de la toxina en una porción de mariscos contaminados resulta fatal para seres humanos.

5. Modelo conceptual de los factores ambientales implicados en la tasa de crecimiento y producción de STX por *P. agardhii*.

De acuerdo con el procedimiento previamente descrito, se procedió a la representación diagramática del modelo conceptual, el cual se presenta en la Figura 2. Conforme a la misma, los principales factores abióticos involucrados en el crecimiento celular de *P.*

agardhii y en la producción de STX se encuentran la temperatura, densidad de flujo de fotones, pH, salinidad y proporción de nitrato y fosfato.

A efecto de perfilar la aplicación del modelo conceptual generado, se deben considerar las características del sistema de interés. Para ello, se deben bosquejar los patrones esperados del comportamiento del modelo, lo cual puede hacerse en términos de la dinámica temporal de los componentes más importantes del sistema. Estos patrones sirven como puntos de referencia, en la eventual evaluación del modelo, a efecto de constatar si el modelo provee o no la predicción esperada (Grant et al., 2001).

6. Características de interés de Laguna de Zumpango

De acuerdo con la información proporcionada en la página web del Estado de México (Estado de México, 2023) la Laguna de Zumpango, cuya etimología náhuatl significa “lugar de hilera de calaveras”, se ubica en el municipio de Zumpango al noreste del estado de México, con coordenadas geográficas entre 19°43’10” y 19°54’52” de latitud norte y los 98°58’12” y 99°11’36” de longitud oeste, a una elevación de 2500 msnm. El clima que predomina en la zona es el de cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temporada de frío es durante los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, mientras que la temporada cálida va de abril a octubre. Los valores de temperatura oscilan entre 31 °C como máxima y de -2.3 °C como mínima, con una media anual de 14.8 °C. La precipitación pluvial total anual es entre 600 y 800 mm, registrándose la mayor precipitación pluvial en el mes de junio. Los vientos predominantes provienen del norte. La Laguna de Zumpango tiene una superficie aproximada de 20 km², profundidad media de 9.5 m, con capacidad de 100 millones de metros cúbicos de agua y una superficie aproximada de 1853 hectáreas. Es uno de los cuerpos de agua con mayor importancia ambiental para el Valle de México. Propicia la recarga de los mantos freáticos de la región, regula la temperatura del sitio, capta CO₂ y da refugio a aves migratorias. Desde el punto de vista hidrográfico (CONAGUA, 2021), la Laguna de Zumpango, pertenece a la Región Hidrológica Administrativa XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. Está integrada por dos cuencas la Cuenca del Río Tula y la Cuenca del Valle de México y bajo la influencia de la Subcuenca del Río de las Avenidas de Pachuca. Sin embargo, debido al bordo que rodea la laguna, los afluentes naturales dejaron de llegar a la misma (Soto,

2015). Técnicamente la Laguna de Zumpango está catalogada como un vaso regulador de agua, el cual permite dotar de agua de riego a los núcleos agrarios de Zumpango-Nextlalpan-Teoloyucan y otra parte del volumen es conducida hacia el Río Tula en el Estado de Hidalgo. En 2003, el Gobierno del Estado de México la decretó Área Natural Protegida “Santuario del Agua” y empezó a ingresar agua de la presa Madín a través del Río Cuautitlán, el cual conduce aguas residuales. Esta situación, aunada a la recepción de la descarga procedente del Túnel Emisor Oriente a las orillas de la Laguna (Soto, 2015) así como de las aportaciones fortuitas provenientes de asentamientos humanos aledaños, incluidos los turísticos, han propiciado la pérdida de la calidad de sus aguas. En la laguna de Zumpango se llevan a cabo actividades de pesca y turísticas y se ha reportado la presencia de peces como carpas (*Cyprinus carpio*) y mexclapique (*Girardinichthys viviparus*), así como de lirio acuático y algas (IMTA, 2012).

7. Presencia de *P. agardhii* productora de STX en la Laguna de Zumpango

Aguilera & Echenique (2011) reportaron un florecimiento de cianobacterias en la Laguna de Zumpango con una densidad de 4.61×10^6 células mL^{-1} . Posteriormente, Rodríguez Guerrero & Luna Pabello (2021) determinaron la presencia de *P. agardhii* (Fig. 3) y de una concentración de 153.0 ngL^{-1} de STX en la Laguna de Zumpango.



Figura 3. Fotografía del ejemplar silvestre *Planktothrix agardhii* presente en la muestra de agua tomada de la Laguna de Zumpango, Edo. de México (Microscopía óptica de contraste de fases 100X). (Tomada de Rodríguez Guerrero & Luna Pabello, 2021).

8. Discusión

8.1. Escenarios que potencian la presencia de *P. agardhii* y la generación de STX en la Laguna de Zumpango

Se percibe que la incidencia, la distribución, la magnitud y la persistencia de estos florecimientos están aumentando globalmente en los últimos años y se relacionan con el aumento de las actividades humanas y el calentamiento global. Sin embargo, las proliferaciones de cianobacterias son fenómenos intrincados y su aparición es el resultado de la unión de varios factores, relacionados, pero no exclusivos, al aumento/reducción de los aportes de nutrientes (Zeyu, Su, Liu, Gua, Wang, Burch, Yu & Yang, 2019). Asimismo, contribuye el aumento de las barreras fluviales, el aumento de los períodos de estratificación del agua, los cambios en el ciclo hidrológico, el aumento global de temperaturas y CO₂ (Churro *et al.*, 2017). Ya sea que esté relacionado o no con el cambio climático, los florecimientos masivos de cianobacterias ya no son estacionales, persisten durante todo el año y tampoco se restringen a los sistemas de aguas tranquilas o limpias, pues ríos y estuarios también se han visto afectados. De acuerdo con Churro *et al.* (2017) los informes de florecimientos de cianobacterias de agua dulce que llegan al mar están aumentando y lo más probable es que se hayan subestimado. Además, el efecto de estos florecimientos en el ecosistema marino y el impacto en los seres humanos y la vida silvestre no han sido muy estudiados. Sin duda, la disminución de los problemas de contaminación de cuerpos acuáticos naturales es complejo y multifactorial (Boopathi & Ki, 2014; Kim Tiam *et al.*, 2022). No obstante, los aspectos preventivos juegan un papel importante (Vergalli, Fayolle, Combes, Franquet & Comte, 2020). En este sentido, evitar la llegada de esos contaminantes, mediante el desvío de ese tipo de aportes hacia plantas depuradoras capaces de remover N y P en cantidades suficientes, permitiría reducir el fenómeno de eutroficación y con ello, la presencia de cianobacterias productoras de STX.

Otro aspecto importante para considerar es el monitoreo de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua de aquellos cuerpos acuáticos de interés como fuente para abastecimiento de agua potable, ambiental o turístico. Lo anterior, debido a que un alto porcentaje de las presas usadas para abasto de agua potable, tienen reporte de presencia de microorganismos que producen sustancias tóxicas. En cuerpos de agua donde exista como especie predominante *P. agardhii* (Xian, Ye, Che, Zhao, Shi, Xiao, Ma, Hou, Chen &

Yang, 2020) y que durante la época de lluvias se reporte la presencia de florecimientos de cianobacterias, durante el inicio de las épocas de frío, temporada en la que se presenta las condiciones más favorables para la síntesis de la STX, las autoridades locales deberán realizar análisis de control para vigilar las concentraciones de STX presente en el cuerpo de agua y en los organismos acuáticos. Acorde con los resultados obtenidos, se establecerían vedas en aquellos cuerpos de agua en los que la concentración de STX resulte superior de $80 \mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ carne (La Barbera Sanchez, Franco, Rojas –Astudillo, Chang Yen, 2004), en el caso organismos para consumo humano o de 200 ng L^{-1} , cuando se trata de agua para consumo humano o de uso recreativo. Un aspecto adicional es el de dar tratamiento al agua con concentraciones que rebasen los valores de STX permitidos. En este caso, podría inclusive pensarse en darle un uso comercial a la misma. Finalmente, se deberá evaluar si el modelo conceptual propuesto para el crecimiento de *P. agardhii* y su producción de STX es aplicable a otras especies de cianobacterias. Mayor información de campo y laboratorio permitirán fortalecer el entendimiento y la elaboración de escenarios de riesgo asociados a la alta presencia de STX.

Conclusiones

A partir de la información publicada en la literatura especializada sobre el tema, se elaboró un modelo conceptual de los factores que intervienen en el crecimiento de *P. agardhii* y la producción de STX, el cual incluye datos de condiciones ambientales en las que se han presentado florecimientos de *P. agardhii* en cuerpos de agua susceptibles de ser empleados con fines recreativos o como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano. La importancia de este modelo conceptual, radica en poder prevenir, aún con la disponibilidad de pocos datos, la posible presencia de un escenario de aparición de *P. agardhii* y STX en un cuerpo de agua. En este sentido, las condiciones más probables en las que la producción de altas cantidades de STX, en cuerpos de agua como la Laguna de Zumpango, cuya concentración podría representar un riesgo para la salud humana o para las especies acuáticas ahí presentes serían: durante la época de lluvias; con presencia de florecimientos de cianobacterias que contengan *P. agardhii*; con baja o muy alta concentración de nitratos; una densidad promedio de flujo fotones $100 \mu_{\text{fotones}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y bajas temperaturas (inicio de las épocas de frío).

Reconocimientos

Se agradece el apoyo económico proporcionado a través del PAIP VMLP 5000-9111 para el período 2020-2022 otorgado por la Facultad de Química de la UNAM. Se agradece al Técnico Auxiliar en Dibujo Arquitectónico, Juan José de los Cobos, el apoyo brindado en la elaboración de la adaptación de la Figura 1.

Referencias

Aguilera, A. & Echenique, R. O. (2011). Consideraciones generales de Cianobacteria: aspectos ecológicos y taxonómicos. *Cianobacterias como determinantes ambientales de la Salud*. Ministerio de Salud de la Nación, Presidencia de la Nación de Argentina.

Andersen, R.A. (2005). *Algal culturing techniques*. Amsterdam: Elsevier.

ANZFA. (2001). Shellfish toxins in food. A toxicological review and risk assessment. Technical Report Series No. 14. *Australia New Zealand Food Authority*. Disponible en: www.nicnas.gov.au/australia/fsanz.htm.

Backer, L., Manassaram-Baptiste, D., LePrell, R. & Bolton, B. (2015). Cyanobacteria and Algae Blooms: Review of Health and Environmental Data from the Harmful Algal Bloom-Related Illness Surveillance System (HABISS) 2007–2011. *Toxins* 7, 1048–1064. <https://doi:10.3390/toxins7041048>.

Berry, J. P. & Lind, O. (2010). First evidence of “paralytic shellfish toxins” and *cylindrospermopsis* in Mexican freshwater system, Lago Catemaco, and apparent bioaccumulation of the toxins in “tegogolo” snails (*Pomacea patula catemacensis*). *Toxicon*, 55, 930-938. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2009.07.035>.

Boopathi, T. & Ki, J. S. (2014). Impact of Environmental Factor on the Regulation of Cyanotoxin Production. *Toxins*, 6: 1951-1978. <https://doi: 10.3390/toxins6071951>.

Carneiro, R. L., Furlanetto-Pacheco, A.B. & Oliveira-e Azevedo, S. M. F. (2013). Growth and Saxitoxin Production by *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) Correlate with Water Hardness. *Mar. Drugs* 11, 2949-2963. <https://doi.org/10.3390/md11082949>.

Carneiro, R. L., Maria Venâncio dos Santos, E., Furlanetto Pacheco A. B. & Oliveira e Azevedo S. M. F. (2009). Effects of light intensity and light quality on growth and circadian rhythm of saxitoxins production in *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria), *Journal of Plankton Research* 31, (5) 481–488. <https://doi: 10.1093/plankt/fbp006>.

Casero, M.C., Ballot, A., Agha, R., Quesada, A. & Cirés, S. (2014). Characterization of saxitoxin production and release and phylogeny of sxt genes in paralytic shellfish poisoning toxin-producing *Aphanizomenon gracile*. *Harmful Algae* 37, 28-37. <https://doi:10.1016/J.HAL.2014.05.006>.

V. M. Luna Pabello et al// Propuesta de modelo conceptual de crecimiento y producción... 8-28

Chaffin, J. D., Davis, T. W., Suith, D. J. & Baer, M. (2018). Interactions between nitrogen form, loading rate, and light intensity on Microcystin and *Planktothrix* growth and Microcystin Production. *Harmful Algae* 73, 84-97. <https://doi:10.1016/j.hal.2018.02.001>.

Chorus, I. (2012). Current approaches to cyanotoxyn risk assesment, risk management and regulations in different countries. *Federal Environmental Agency*.

Chorus, I. & Bartram, J. (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water—A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. Londres & Nueva York: Routledge. <https://doi: 10.1016/j.hal.2014.10. 002..>

Churro, C., Azevedo J., Vasconcelos, V. & Silva, A. (2017). Detection of a *Planktothrix agardhii* Bloom in Portuguese Marine Coastal Waters. *Toxins* 9(12), 391. <https://doi: 10.3390/toxins9120391>.

Cirés, S. & Quesada, A. (2016). *Catálogo de cianobacterias planctónicas potencialmente tóxicas de las aguas continentales españolas*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 48-49. <https://doi: 9788449110726>.

CONAGUA (2021). Estadísticas del Agua de la Región Hidrológica Administrativa XIII Aguas del Valle de México. [en línea]: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-del-agua-de-la-region-hidrologica-administrativa-xiii-aguas-del-valle-de-mexico>

Corbel, S., Mougín, C. & Bovaicha., N. (2013). Cyabobacterial toxins: modes of actions, fate in aquaticand soil ecosystems, Phytotoxicity and bioaccumulation in agricultural corps. *Pharmacol.* 265, 263-271. <https://doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.056>.

Cyanocenter UBA. (2021). Toxic cyanobacteria. Disponible [en línea] <https://toxische-cyanobakterien.de/en/background-information/toxic-cyanobacteria/>

De León, L. (2017). Florecimientos de cianobacterias en aguas continentales del Uruguay: causas y consecuencias. En Domínguez, A. & R. G. Prieto (Ed.). *Perfil Ambiental del Uruguay* (pp. 28-37). Nordan-Comunidad, Montevideo, 2002. <https://fdocuments.mx/document/floraciones-de-cianobacterias-en-aguas-continentales-del-uruguay.html?page=1>.

Días, E., Pereira, P. & Franca, S. (2002). Production of Paralytic shellfish toxins by *Aphanizomenon* sp. LMECYA 31 (Cyanobacteria). *J. Phycol.* 38, 705-712. <https://doi: 10.1046/j.1529-8817.2002.01146. x>.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2019). Guidelines and Recommendations; What are the health-based standards or guidelines for cyanobacteria/cyanotoxins in drinking water? Ohio, EU.: Nutrient Policy and Data. Disponible [en línea] https://19january2017snapshot.epa.gov/nutrient-policy-data/guidelines-and-recommendations_.html#what2.

Estado de México (2023). Municipio de Zumpango. Laguna de Zumpango. [en línea]. <https://estadodemexico.com.mx/municipio/zumpango/>

Figuroa-Torres, M.G., Arana-Magallón, F., Almanza-Encarnación, S., Ferrara-Guerrero, M. J. & Ramos-Espinosa, M.G. (2015). Microalgas del Área Natural Protegida Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, México. *Ciencia UAT* 9(2), 15-29.

Fournier, C., Riehle, E., Dietrich, D. R. & Schleheck, D. (2021). Is toxin producing *Planktothrix* sp. an Emerging Species in Lake Constance. *Toxins* 13, 666. <https://doi.org/10.3390/Toxins3090666>.

Gad, S. E. Saxitoxin. *Encyclopedia of Toxicology* (Third Edition), Pages 218-220 (Academic Press, Cambridge, 2014) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00925-8>.

Gaget, V., Welker, M. & Rippka, R. A polyphasic approach leading to the revision of the genus *Planktothrix* (Cyanobacteria) and its type species, *P. agardhii*, and proposal for integrating the emended valid botanical taxa, as well as three new species, *Planktothrix paucivesiculata* sp. nov. ICNP, *Planktothrix tepida* sp. nov. ICNP, and *Planktothrix sarta* sp. nov. ICNP, as genus and species names with nomenclatural standing under the ICNP. *Systematic and Applied Microbiology*. 38(3), 141-58 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2015.02.004>.

Graham, J. L., Loftin, K. A. & Kamman, N. (2009). Monitoring recreational fresh waters. *Lakeline*. 29,18-24. <https://doi.org/10.3133/sir20155120>.

Grant, W.E., Marin S. L. & Pedersen E. K. (2001). Ecología y manejo de recursos naturales: Análisis de sistemas y simulación. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Ed. Agromérica. San José, Costa Rica. 346 pp.

Hambright, K.D., Zamor R.M., Easton J.D. & Allison B. (2014). *Algae*. Amsterdam: Elsevier Inc.

Ibelings, B., Backer, L., Kardinaal, E. & Chorus, I. (2015). Current approaches to cyanotoxin risk assessment and risk management around the globe. *Harmful Algae*, 49, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2014.10.002>.

IMTA. (2012). Plan Estratégico para la Recuperación Ambiental de la Laguna de Zumpango, Diagnóstico e Identificación de Retos, Problemas, Estrategias, Objetivos, Acciones y Proyectos Prioritarios. Resumen ejecutivo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Fundación Gonzalo Río Arronte. Disponible en línea en: [https://agua.org.mx/biblioteca/plan-estrategico-para-la-recuperacion-ambiental-de-la-laguna-de-zumpango-diagnostico-e-identificacion-de-retos-problemas-estrategias-objetivos-acciones-y-proyectos-prioritarios/](https://agua.org.mx/biblioteca/plan-estrategico-para-la-recuperacion-ambiental-de-la-laguna-de-zumpango-diagnostico-e-identificacion-de-retos-problemas-estrategias-objetivos-acciones-y-proyectos-prioritarios/plan-estrategico-para-la-recuperacion-ambiental-de-la-laguna-de-zumpango-diagnostico-e-identificacion-de-retos-problemas-estrategias-objetivos-acciones-y-proyectos-prioritarios/).

V. M. Luna Pabello et al// Propuesta de modelo conceptual de crecimiento y producción... 8-28

Kellmann R. & Neilan B.A. (2007). Biochemical characterization of paralytic shellfish toxin biosynthesis in vitro. *Journal of Phycology* 43: 497-508. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2007.00351.x>.

Kim Tiam, S., Comte, K., Dalle, C., Delagrangé, M., Djediat, Ch., Ducos, B., Duval, Ch., Feilke, K., Hamlaoui, S., Le Manach, S., Setif, P., Yépreman, C., Marie, B., Kirilovsky, D., Gugger, M. & Bernard, C. (2022). The Success of the Bloom-forming Cyanobacteria *Planktothrix*: Genotypes variability supports variable responses to light and temperature stress. *Harmful Algae* 117. 102285. <https://doi.org/10.1016/J.Hal.2022.102285>.

Komárek, J. & Anagnostidis, K. (2005). Süßwasserflora von Mitteleuropa. 19 Cyanoprokaryota Teil 2 Oscillatoriales. München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag. <https://doi:10.4236/apm.2015.52012>.

Komárek, J. & Komárková-Legnerová, J. (2002). Contribution to the knowledge of planktic cyanoprokaryotes from central Mexico. *Preslia* 74, 207–233.

La Barbera-Sánchez, A., Franco, José M., Rojas de Astudillo, L. & Chang Yen, I. (2004). Paralytic Shellfish Poisoning (PSP) in Margarita Island, Venezuela. *Revista de Biología Tropical* 52(S1): 89-98. <http://hdl.handle.net/10261/56134>.

Lee, R. E. (2008). *Phycology*. (4th edition). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi:10.1017/S0960428609990072>.

Li, X., Dreher T. W. & Li, R. (2016). An overview of diversity, occurrence, genetics and toxin production of bloom-forming *Dolichospermum* (*Anabaena*) species. *Harmful Algae*. 54, 54-68. <https://doi:10.1016/j.hal.2015.10.015>.

Loftin, K., Graham, J., Hilborn, E., Lehmann, S., Meyer, M., Dietze, J. & Griffith C. (2016). Cyanotoxins in Inland Lakes of the United States: Occurrence and Potential Recreational Health Risks in the EPA National Lakes Assessment 2007. *Harmful Algae* 56, 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.04.001>.

Margalef, R. (1981). Características de las aguas de represa como indicadoras de los ecosistemas terrestres de las respectivas cuencas: *Reuniao sobre ecologia e proteçao de águas continentais* 93-110.

Microbial Culture Collection. (2016). Strain Data *Planktothrix agardhii*. Japón: Instituto Nacional de Estudios Ambientales. National Institute for Environmental Studies. Disponible [en línea] <http://mcc.nies.go.jp/strainList.do?strain>.

Moisander, P.H. & Paerl, H.W. (2000). Growth, primary productivity and nitrogen fixation potential of *Nodularia* spp. (Cyanophyceae) in water from a subtropical estuary in the United States. *Journal of Phycol* 36, 645-658. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.99227.x>.

V. M. Luna Pabello et al// Propuesta de modelo conceptual de crecimiento y producción... 8-28

Moisander, P. H., Hench, J. L., Kononen, K. & Paerl, H. W. (2002). Small-scale shear effects on heterocystous cyanobacteria. *Limnology and oceanography* 47(1), 108–119. <https://doi:10.4319/lo.2002.47.1.0108>.

Paerl, H.W. (1988). Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnol Oceanogr.* 33, 823-847. <https://doi:10.4319/LO.1988.33.4PART2.0823>.

Paerl, H.W. (1990). Physiological ecology and regulation of N₂ fixation in natural waters. *Adv. Microbiol Ecol.* 11, 305-344. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7612-5_8.

Paerl, H.W & Gallucci, K.K. (1985). Role of Chemotaxis in establishing specific nitrogen fixing cyanobacteria-bacterial associated with dinoflagellates. *Toxicon.* 27, 1241-1244. <https://doi:10.1126/science.227.4687.647>.

Paerl, H. W. & Scott, T. (2010). Throwing fuel on the fire; Synergistic effects of excessive nitrogen inputs and global warming on harmful algal blooms. *Environ. Sci. Technol.* 44, 7756-7758. <https://doi.org/10.1021/es102665e>.

Paerl H. W & Millie D.F. (1996). Physiological ecology of toxic cyanobacteria. *Phycology.* 35,160-167. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-35-6S-160.1>.

Pawlik-Skownska, B., Kalinowska, R. & Skoronski, T. (2013). Cyanotoxin diversity and food web bioaccumulation in a reservoir with decreasing phosphorus concentrations and perennial cyanobacterial blooms. *Harmful Algae* 28, 118-125. <https://doi:10.1007/s10750-016-2842-3>.

Pearson, L. A., Dittmann, E., Mazmouz, R., Ongley, S. E., D'Agostino P. M. & Neilan B. A. (2016). The genetics, biosynthesis and regulation of toxic specialized metabolites of cyanobacteria. *Harmful Algae* 54, 98-111. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109663>.

Pomati, F., Sacchi, S., Rossetti, C., Giovannardi, S., Onodera, H., Oshima, Y. & Neilan, B.A. (2000). The freshwater cyanobacterium *Planktothrix* sp. FP1: Molecular identification and detection of paralytic shellfish poisoning toxins. *J. Phycol.* 36, 553–562. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.99181.x>.

Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist.* 46, 205–221. <https://doi:10.4236/jep.2018.95030>.

Reynolds, C. & Walsby, A. (1975). Water-Blooms. Biological Reviews. *Cambridge Philos Soc.* 50, 437-481. <https://doi:10.1111/j.1469-185X.1975.tb01060.x>.

Rodríguez Guerrero, L. A. & Luna Pabello V. M. (2021). Capítulo 20. Determinación de una cepa silvestre de *Planktothrix agardii* productora de saxitoxina procedente de la laguna de Zumpango, Estado de México. En Gómez Oliván L. M. et al. (Ed.). *Contribuciones Selectas en Ecotoxicología y Química Ambiental* (pp. 601-618) Ciudad de México: AMEQA.

Rosso, L. & Giannuzzi, L. (2011). Factores ambientales y antropogénicos que afectan la formación de floraciones de cianobacterias y cianotoxinas. *Cianobacterias como*

determinantes ambientales de la Salud, Ministerio de Salud de la Nación, presidencia de la nación de argentina 1, 71-86. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/72655>.

Scheffer, M., Rinaldi, S., Gragnani A., Mur, L. R. & Van Nes, E. H. (1997). On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecology* 78(1) 272-282. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[0272:OTDOFC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0272:OTDOFC]2.0.CO;2)

Smith, V. H. (1990). Nitrogen, phosphorus and nitrogen fixation in lacustrine and estuarine ecosystems. *Limnol Oceanogr.* 35, 1852-1859. <https://doi.org/10.4319/lo.1990.35.8.1852>.

Soto, C. E. (2015). Regeneración Urbana de la Laguna de Zumpango. Tesis Lic. en Arquitectura. Ciudad de México, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM.

Soto-Liebe, K., Méndez, M. A., Fuenzalida, L., Krock, B., Cembella, A. & Vásquez, M. (2012). PSP toxin release from the cyanobacterium *Raphidiopsis brookii* D9 (Nostocales) can be induced by sodium and potassium ions. *Toxicon* 60, 1324–1334. <https://doi:10.1016/j.toxicon.2012.09.001>.

Thottumkara, A. P., Parsons, W. H. & Du Bois, J. (2014). Saxitoxin. *Angew Chem Int Ed Engl.* 53(23), 5760-5784. <https://doi:10.1002/anie.201308235>.

Vasconcelos, V., Martins, A., Vale, M. Antunes, A., Azevedo, J., Welker, M. Lopez, O. & Montejano, G. (2010). First report on the occurrence of microcystins in planktonic cyanobacteria from Central Mexico. *Toxicon* 56, 425-431. <https://doi:10.1016/j.toxicon.2010.04.011>.

Van de Waal, D.B, Ferreruela, G., Tonk., Van Donk, E., Huisman, J., Visser, P.M. & Matthijs, H. C. P. (2010). Pulsed nitrogen supply induces dynamic changes in the amino acid composition and microcystin production of the harmful cyanobacterium *Planktothrix agardhii*. *FEMS Microbiol. Ecol* 74, 430-438. <https://doi:10.1111/j.1574-6941.2010.00958.x>.

Vela, L., Sevilla, E., Martín, B., Pellicer, S., Bes, M.T., Fillat, M. F. & Peleato, M. L. (2007). Las microcistinas. *Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza* 62, 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2008.07.008>.

Velzeboer, R. M. A., Baker, P.D. & Rositono, J. (2001). Saxitoxins associated with the growth of the cyanobacterium *Anabaena circinalis* (Nostocales, Cyanophyta) under varying sources and concentrations of nitrogen. *Phycologia* 3,305-312. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-40-3-305.1>.

Vergalli, J., Fayolle, S., Combes, A., Franquet, E. & Comte, K. (2020). Persistence of microcystine production by *Planktothrix agardhii*. (Cyanobacteria exposed to different salinities) *Phycologia* 59, 1,24-34. <https://doi 10.1080/oo318884.2019.1664875>.

Wiese, M., D'Agostino, P. M., Mihali, T. K., Michelle, C. & Neila B. A. (2010). Neurotoxic Alkaloids: Saxitoxin and Its Analogs. *Journal of Marine Drugs* 8, 2185-2211. <https://doi:10.3390/md8072185>.

V. M. Luna Pabello et al// Propuesta de modelo conceptual de crecimiento y producción... 8-28

Xian, Z., Ye, Y., Chen, L., Zhao, H., Shi, Q., Xiao, Y., Ma, L., Hou, X., Chen, Y. & Yang, F. (2020). Functional role of Bloom forming Cyanobacterium *Planktothrix* in ecologically shaping aquatic environments. *Science of the Environment* 710, 136314. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136314>

Zamora-Barrios C. A., Nandini S. & Sarma S.S.S. (2019). Bioaccumulation of microcystins in seston, zooplankton and fish: A case study in Lake Zumpango, México, *Environmental Pollution* 249, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.029>.

Zastepa, A., Miller, T. R., Watson, L. C., Kling, H. & Watson, S. B. (2021). Toxins and other Bioactive Metabolites in Deep Chlorophyll Layers Containing the Cyanobacteria *Planktothrix* cf. *Isothrix* in two Georgian Bay Embayment's, Lake Huron. *Toxins* 13, 443. <https://doi.org/103390/toxins 2021 13070445>.

Zeyu, J., Su, M., Liu, T., Gua, Q., Wang, Q., Burch, M., Yu, J. & Yang, M. (2019). Light a possible regulator of MIB-producing *Planktothrix* in source water reservoir, mechanism and in site verification. *Harmful Algae* 88, 101658 <https://doi.org/10.1016/J. Hal>.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Copyright

La *Revista Latinoamericana de Difusión Científica* declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia Creative Commons

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

