



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA



Evaluación *in vitro* de la relación mutuamente excluyente entre especies de cianobacterias tóxicas pertenecientes a los géneros *Microcystis sp.* y *Anabaena sp.* bajo tres condiciones de irradiación luminosa.

T E S I S

Que para obtener el título de:

BIÓLOGA

Presenta:

Yareni Michelle Jaimes Pat

**Director de Tesis:
Dr. Pedro Ramírez García**

Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Al Dr. Pedro Ramírez García mi director de tesis, por confiar en mí para llevar a cabo este proyecto el cual sin duda alguna significó para mí una gran cantidad de retos pero sobre todo de aprendizajes y oportunidades.

Al Dr. Diego de Jesús Chaparro Herrera, a quien le tengo gran admiración no sólo por todo lo que ha logrado sino también por la calidad de persona que es. No existen cantidad de palabras para agradecerle todo lo que recibí de usted. Gracias por abrirme las puertas del laboratorio. Por sus consejos, su apoyo y todos los conocimientos que me compartió.

A la Dra. Michelle Figueroa por su apoyo, por compartirme sus conocimientos y por ser un soporte en el momento en el que lo necesité.

A la Dra. Rocío Fernández y a la Profesora María de los Ángeles García por su tiempo, por sus consejos y por su apoyo para lograr concluir de la mejor forma este trabajo.

Al proyecto CyMA por haberme brindado los recursos y el espacio necesarios para llevar a cabo este proyecto.

A la Facultad de Estudios Superiores Iztacala por haber sido mi segundo hogar, por permitirme estudiar aquello que tanto deseaba y por brindarme las herramientas necesarias para hacerlo. Así como a la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme no solo a mí sino a miles de estudiantes cumplir nuestros sueños.

Agradecimientos personales

A mis padres:

A mi mamá por permanecer siempre a mi lado, por impulsarme y por apoyar todos y cada uno de mis sueños sin importar lo irreales que puedan parecer. Por demostrarme en más de una ocasión que no hay imposibles, así como por siempre recordarme que todo sueño merece un esfuerzo, pero sobre todo por siempre tener un abrazo listo para cuando lo necesité.

A mi papá por siempre recordarme que mi valor iba más allá de una calificación, por apoyarme, por las noches de desvelo en las que me acompañó mientras terminaba las tareas, y por todas sus pláticas, consejos y enseñanzas.

A ambos les debo muchísimo y les agradezco con el corazón cada uno de los esfuerzos que han hecho por mí, pero sobre todo por estar ahí, son mi tesoro.

A Hannah, Tiana y Ágatha, por siempre estar a mi lado, pero sobre todo por mejorar mi vida día con día.

A mi abuelita y a mi familia Pat por siempre estar ahí para mí, cada una a su forma pero siempre con mucho amor.

A mis amigos Susana, Eithan, Eli, José y Sergio por haber sido no sólo un increíble equipo a lo largo de la carrera, sino también por haberme brindado su amistad y su apoyo en más de una ocasión. Por cada una de las risas que viví a su lado y porque sin ellos la carrera no hubiera sido igual. Que gusto haberlos encontrado.

A Darío y a Miguel por el tiempo y la paciencia que tuvieron para enseñarme y ayudarme a llevar a cabo este proyecto, pero sobre todo por haber sido mis primeros amigos dentro del laboratorio.

A Itzel y a Diana por todas las aventuras y momentos juntas en el laboratorio, por cada plática y risa. Por siempre brindarme sus mejores consejos, ánimos y apoyo.

INDICE

1. RESUMEN	5
2. INTRODUCCIÓN	6
2.1 Cianobacterias	6
2.2 <i>Anabaena</i> sp.	9
2.3 <i>Microcystis</i> sp.....	10
2.4 Florecimientos algales	11
2.5 Cambio climático	12
2.6 Situación en México	13
3. ANTECEDENTES	14
4. JUSTIFICACIÓN	16
5. HIPÓTESIS	17
6. OBJETIVOS	17
6.1 Objetivo General	17
6.2 Objetivos particulares.....	17
7. METODOLOGÍA	18
7.1 Laboratorio	18
7.2 Gabinete.....	19
8. RESULTADOS	20
8.1 Crecimiento poblacional de <i>Anabaena</i> sp. bajo diferentes intensidades de irradiación luminosa	20
8.2 Resultados morfológicos de <i>Anabaena</i> sp.....	24
8.3 Crecimiento poblacional de <i>Microcystis</i> sp. bajo diferentes intensidades de irradiación luminosa	25
8.4 Resultados morfológicos de <i>Microcystis</i> sp.....	29
8.3 Resultados de la relación mutuamente excluyente entre ambos géneros. ...	30
9. DISCUSIÓN	31
10. CONCLUSIÓN	34
11. PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES	34
11. BIBLIOGRAFÍA	35
12. ANEXOS	42

1. RESUMEN

Los cuerpos de agua dulce se encuentran dentro de los ecosistemas más vulnerables frente al cambio climático, debido a todas las alteraciones fisicoquímicas que se producen. Favoreciendo así, la proliferación de diferentes organismos, entre ellos las cianobacterias, que de presentar un crecimiento desmedido y prolongado pueden generar daños constantes e irreparables en los cuerpos de agua.

En este trabajo se evaluó a dos de los principales géneros de cianobacterias reconocidos como formadores de florecimientos algales (*Anabaena* sp. y *Microcystis* sp.), bajo uno de los factores menos evaluado y a su vez identificado como parte de los principales responsables de incentivar un rápido crecimiento poblacional que da lugar a los florecimientos algales, esto es la incidencia de luz. Así como el comportamiento de ambos géneros al enfrentarse entre sí por un mismo recurso.

Con base en esto último, se experimentó para determinar de qué manera se verían afectadas por la incidencia de la luz, se realizaron conteos celulares de cada género al estar expuesto bajo diferentes irradiancias luminosas, obteniendo como resultado que ambos géneros son capaces de desarrollarse poblacionalmente en cualquier intervalo de irradiancia luminosa. Sin embargo, se observó que *Anabaena* sp. se ve mayormente favorecida al enfrentarse a una irradiancia luminosa mayor, mientras que *Microcystis* sp. puede desarrollarse poblacionalmente en gran medida en cualquier irradiancia luminosa, incluyendo las más bajas y que ambas generan cambios morfológicos según sus necesidades.

De igual forma se observó que al encontrarse en competencia por un mismo recurso *Microcystis* sp. es capaz de desplazar a *Anabaena* sp. hasta su extinción.

Palabras clave: Cianobacterias, factores fisicoquímicos, irradiancia luminosa, florecimiento algal, competencia.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Cianobacterias

Las cianobacterias, también conocidas como algas verde-azules, son los organismos fotosintéticos procariontes más antiguos conocidos por el hombre (Kurmayer *et al.*, 2017). Los cuales cuentan con el mismo aparato fotosintético presente en las algas eucariotas y en las plantas superiores (Aguilera *et al.*, 2011). Se estima que han logrado permanecer en la Tierra desde hace 3500 millones de años (Tripathi *et al.*, 2007) y que fueron los responsables de formar lo que hoy conocemos como atmósfera aeróbica hace aproximadamente 2400 millones de años. Incluso hoy en día continúan participando en ciclos importantes como el del carbono y el nitrógeno (Meriluoto *et al.*, 2017).

Estos organismos son un grupo amplio tanto genómica como morfológicamente, presentando individuos filamentosos (*Anabaena*), ramificados, unicelulares y coloniales (*Microcystis*) (Sharma *et al.*, 2013). Su clasificación permanece en constante revisión, la cual depende comúnmente de su morfología, modo de reproducción, ultraestructura, fisiología, química y últimamente completada con el análisis genético (Calderon- Díaz *et al.*, 2014). Es importante mencionar que al igual que otros organismos procariontes, las cianobacterias carecen de un núcleo rodeado por alguna membrana (Callejas, 2007). Sin embargo cuentan con gránulos de glucógeno, cianoficina y carboxisomas (Stadtländer *et al.*, 2013) así como tilacoides con ambos aparatos fotosintéticos y ftopigmentos como clorofila a, ficocianinas y ficoeritrinas responsables no solo de brindarles su coloración distintiva azul-verdosa (Ariño *et al.*, 2021), sino también de facilitarles mayor absorción de luz en el intervalo de radiación fotosintéticamente activa (PAR) e incluso protección UV (Shevela *et al.*, 2013).

A lo largo de los años han logrado destacar debido a su amplia distribución alrededor del mundo, siendo posible encontrarlas en aguas continentales, estuarinas, marinas e incluso por medio de simbiosis en la tierra (Boddula *et al.*, 2016). Su amplia distribución se debe a su gran capacidad de adaptación y

resistencia a todo tipo de ambientes, incluso aquellos que se han visto gravemente dañados (Ceballos-Laita *et al.*, 2015). Esta cualidad las convierte no sólo en un fuerte competidor para los organismos con los que comparten hábitat sino también en un gran peligro para los mismos (Fernández *et al.*, 2013).

Dentro de las cualidades que poseen las cianobacterias podemos hacer referencia a los fotopigmentos anteriormente mencionados, los cuales pueden aumentar o disminuir según sus necesidades (Ariño *et al.*, 2021) , así como a su capacidad de fijación de Nitrógeno (N), almacenamiento de Fosforo (P), Secuestro de Hierro (Fe) (Paerl & Otten, 2013) y a la síntesis de metabolitos secundarios, más comúnmente conocidos como cianotoxinas (Ceballos-Laita *et al.*, 2015), las cuales resultan altamente peligrosas para la salud de diversos organismos, incluidos los seres humanos (Wang *et al.*, 2021).

Las cianotoxinas son sustancias que presentan gran diversidad química como: péptidos cíclicos, alcaloides y polisacáridos (Pérez *et al.*, 2008) comúnmente clasificadas según el tipo de riesgo que generen: Hepatotoxinas, Neurotóxicas, Citotoxinas, Dermatotoxinas, entre otras (**Tabla 1**) (Codd *et al.*, 2016). No obstante, es importante mencionar que no todas las cianobacterias tienden a producir cianotoxinas. La presencia o ausencia de las mismas puede deberse a distintos factores como la posesión de los genes apropiados para generarlas o bien a las condiciones ambientales a las que se encuentren expuestas (Islam & Beardall, 2017).

Dentro de los principales géneros formadores de cianotoxinas se encuentran: *Microcystis*, *Cylindrospermopsis*, *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Nodularia*, *Phormidium*, *Planktothrix* y *Pseudoanabaena* (Salazar-Alcaraz *et al.*, 2021). Los cuales también resultan ser los principales géneros responsables de desencadenar florecimientos algales en los cuerpos de agua, por lo que al presentarse este tipo de eventos lo principal es identificar las especies que lo conforman y así evaluar el tipo de riesgo que representan (Roset *et al.*, 2001).

Tabla 1. Cianotoxinas: Estructuras químicas, principales fuentes y formas de acción. Tabla completada de Codd et al., 2016.

Cianotoxinas	Estructura química	Cianobacterias productoras	Afección
Microcystinas	Heptapeptidos cíclicos	<i>Microcystis, Anabaena, Planktothrix(Oscillatoria), Nostoc, Hapalosiphon, Anabaena</i>	Hígado
Nodularinas	Pentapéptidos cíclicos	<i>Nodularia, Nostoc</i>	Hígado
Anatoxina-a	Alcaloides bicíclicos	<i>Anabaena, Planktothrix(Oscillatoria), Aphanizomenon</i>	Sinapsis nerviosa
Anatoxina-a(S)	N-hidroxiguanina cíclica fosforilada	<i>Anabaena</i>	Sinapsis nerviosa
Saxitoxinas	Alcaloides	<i>Anabaena, Aphanizomenon, Lyngbya, Cylindrospermopsis</i>	Axones nerviosos
Aplasiatoxina	Alcalodes indol	<i>Lyngbya, Schizothrix, Planktothrix(Oscillatoria)</i>	Piel
LPS	Lipopolisacaridos	Todos los géneros	Irritante potencial de tejidos expuestos

- **Hepatotoxinas**
- **Neurotoxinas**
- **Dermatotoxinas**

2.2 *Anabaena* sp.

Dentro del género *Anabaena* sp. se han descrito más de 100 especies (Kirilov & Naneva, 2016). Las cuales se encuentran clasificadas dentro del grupo de las cianobacterias filamentosas con heterocistos (**Figura 1**) (células que les confieren la capacidad de fijar nitrógeno) (Gugger *et al.*, 2002), los cuales se encuentran intercalados a lo largo del filamento.

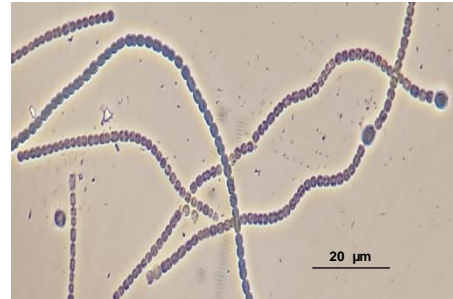


Figura 1. *Anabaena* sp. en donde se pueden apreciar los heterocistos. Fotografía de autoría propia

Los filamentos están conformados por un conjunto de células esféricas y en forma de barril con coloraciones verde-azules o verde oliva (Prasanna *et al.*, 2006), además de otras estructuras como aquinetos, aerotopos y tricomas. Dichos filamentos pueden encontrarse en solitario o formando racimos (Rajaniemi *et al.*, 2005).

Son participantes comunes en los florecimientos algales y cuentan con distribución cosmopolita (**Figura 2**) (Becker *et al.*, 2010). Característica que en conjunto con el hecho de que varias de las especies pertenecientes a este género son capaces de generar al menos 3 diferentes compuestos tóxicos como microcystinas, neurotóxicas hepatotóxicas (Gugger *et al.*, 2002), ha provocado el incremento de interés en su estudio.

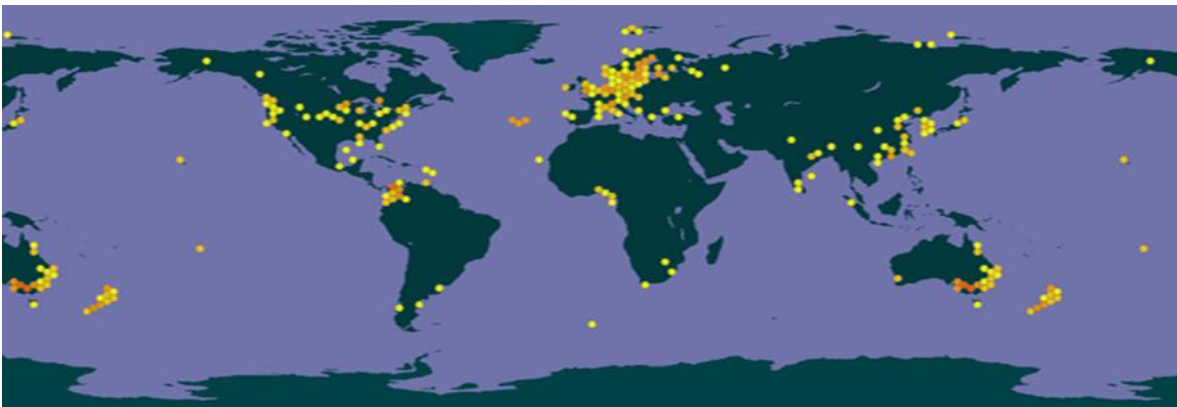


Figura 2. Distribución mundial de *Anabaena* sp. (<https://www.gbif.org/species/8855997>).

2.3 *Microcystis* sp.

El género *Microcystis* se encuentra conformado por organismos unicelulares con morfología esférica u ovalada, presentes comúnmente en cuerpos de agua continental como lagos, embalses y estanques (Otsuka *et al.*, 2000). Son generalmente formadores de colonias micro- y macroscópicas (**Figura 3**), las cuales se encuentran delimitadas por una cubierta de mucilago incoloro y amorfo (Komárek & Komárková, 2002), que se hace presente únicamente en su forma colonial.

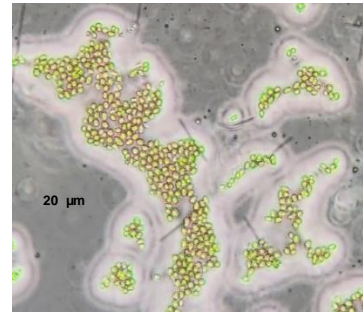


Figura 3. *Microcystis* sp. de manera colonial rodeada por mucilago. Fotografías de autoría propia

Se caracterizan por presentar vesículas de gas en la etapa vegetal, permitiéndoles desplazarse en la columna de agua, además de ser potenciales productores de toxinas como polipéptidos hepatotóxicos más comúnmente conocidos como microcistinas (Otsuka *et al.*, 2000) las cuales son liberadas al medio generalmente como mecanismo de defensa o competencia.

La formación de colonias es una característica que en condiciones naturales le confiere una alta gama de habilidades adaptativas para dominar los cuerpos de agua afectados por el cambio climático y la eutrofización (Shan *et al.*, 2019), ya que se ven favorecidos por factores como las altas temperaturas, la alta incidencia de luz y por un pH alcalino (Becker *et al.*, 2010). Gracias a estas características *Microcystis* es un género de alta plasticidad ambiental lo cual lo ha identificado como principal género formador de florecimientos algales (Pineda-Mendoza *et al.*, 2011) y de amplia distribución alrededor del mundo (**Figura 4**).



Figura 4. Distribución mundial de *Microcystis* sp. (<https://www.gbif.org/species/11260549>)

2.4 Florecimientos algales

Los florecimientos algales o blooms son eventos generalmente naturales que han tenido lugar a lo largo de los años, adquiriendo mayor atención a partir del siglo XX debido a su notable aumento (Becker *et al.*, 2010). Se representan por el rápido incremento de la biomasa de fitoplancton como dinoflagelados, diatomeas y cianobacterias (Sanseverino *et al.*, 2016). Siendo estas últimas son las más comunes en los cuerpos de aguas continentales (Salazar *et al.*, 2021).

Estos eventos son clasificados como desastres biológicos (Salazar *et al.*, 2021) por afectar el funcionamiento de las redes tróficas de los ecosistemas acuáticos y por consiguiente alterar el buen funcionamiento de estos (Rigosi *et al.*, 2014). Esto se debe a que aproximadamente el 50 % de estos fenómenos suelen ser tóxicos, (Roset *et al.*, 2001), además de generar condiciones anóxicas que resultan perjudiciales para el resto de los organismos que cohabiten el mismo sitio, así como afectar a su vez de manera económica y recreativa debido a su mal olor e imagen (Becker *et al.*, 2010). Se perciben como natas verdosas y flotantes en la superficie de los cuerpos de agua.

Ocurren frecuentemente en cuerpos de aguas calmadas (Becker *et al.*, 2010) y son incentivados por un conjunto de factores físicos, químicos y biológicos (Sanseverino *et al.*, 2016). De los cuales podemos mencionar como uno de los principales a la eutrofización que consiste en el aumento excesivo de nutrientes, principalmente Fosforo P y Nitrógeno (Huang *et al.*, 2014). Condición que se ha visto incrementada por diferentes actividades antropogénica como la ganadería, el uso de fertilizantes y la descarga de desechos (Namsaraev *et al.*, 2020).

Así como el cambio climático que ha generado modificaciones en el ciclo hidrológico (Useros, 2013), lo cual a su vez ha generado cambios en otros factores como la intensidad de la luz, la temperatura y el pH (Namsaraev *et al.*, 2020), brindándoles las condiciones idóneas para su proliferación. Es decir, altas temperaturas y pH alcalino (Roset *et al.*, 2001).

2.5 Cambio climático

El cambio climático se ha vuelto un tema de dominio público, el cual es necesario entender para poder evaluar sus consecuencias y así determinar el grado de vulnerabilidad de los diferentes ecosistemas (Magaña *et al.*, 2014). Cuando hablamos de cambio climático, hacemos referencia a las variaciones en temperatura que ocurren en la Tierra provocadas de manera natural o por causas antropogénicas, estas variaciones cuentan con registros de tiempo comparables, es decir que están presentes durante un tiempo indefinido (Ballesteros & Aristizabal, 2007).

La temperatura ha sido considerada una de las variables más importantes ya que de manera directa o indirecta afecta los diferentes factores que se relacionan con la vida (Mora-Orozco *et al.*, 2011). Sin embargo es importante resaltar que esta es solo el resultado de cambios en los factores de forzamiento internos o externos (Ballesteros & Aristizabal, 2007), es decir alteraciones provocadas por inestabilidad de la atmosfera, cambios en la radiactividad solar, gases de efecto invernadero, entre otros (Magaña, 2004).

La radiactividad solar es la principal responsable de determinar la temperatura de la Tierra (Useros, 2013), mediante el equilibrio de dos parámetros que se compensan entre si conocidos como albedo y emisividad. Estos términos hacen referencia a la cantidad de radiación solar recibida y reflejada por la Tierra, así como la cantidad de radiación emitida por la misma respectivamente (**Figura 5**). Las alteraciones en ambos parámetros también generan un aumento importante en cuanto al espesor de las nubes, lo que en consecuencia genera también alteraciones en el ciclo hidrológico (Uribe, 2019).

Es por esto que los cuerpos de aguas continentales son uno de los ecosistemas más vulnerables (Chen *et al.*, 2016), enfrentándose no solo a cambios en temperatura y a mayor incidencia de radiación, sino también a un aumento de nutrientes debido al incremento de escorrentías hacia los ríos generando así en muchas ocasiones daños severos e irreversible (Useros, 2013).

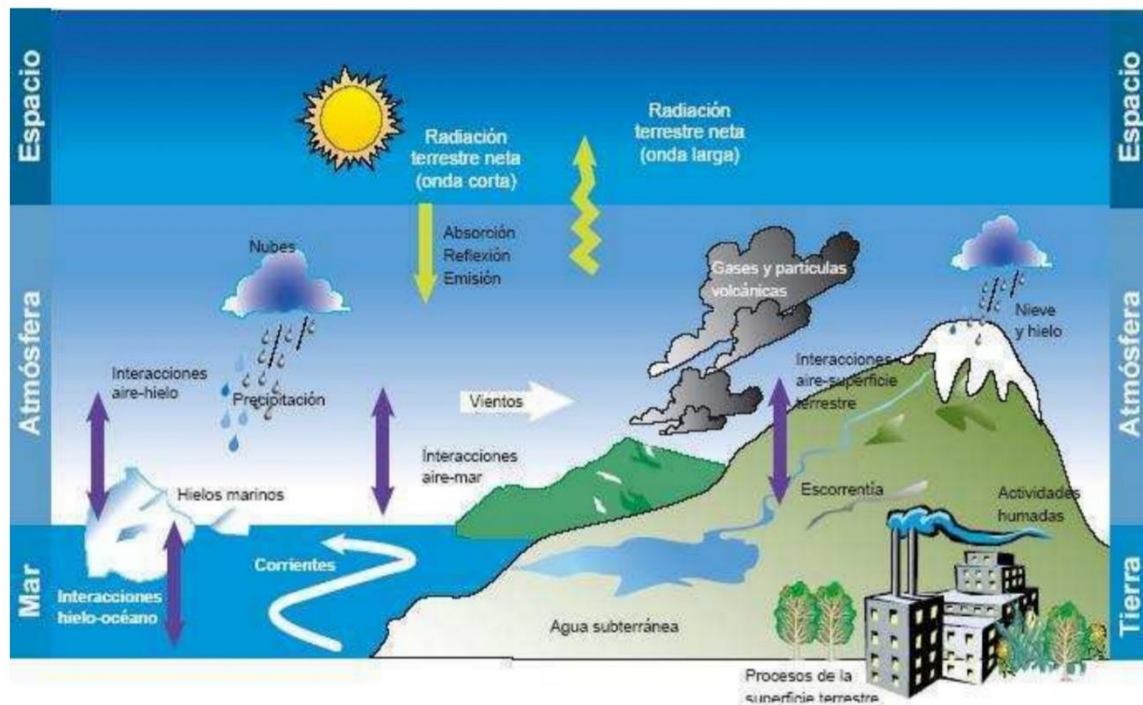


Figura 5. Representación de albedo y emisividad, así como los componentes que intervienen en el funcionamiento natural de ambos (Ballesteros & Aristizabal, 2007).

2.6 Situación en México

México es uno de los países con mayor diversidad de cianobacterias y los blooms relacionados a ellas son muy comunes, no obstante su estudio es escaso (Salazar *et al.*, 2021). A lo largo de los años, se han registrado una gran cantidad de florecimientos algales en estados, como: Jalisco, Michoacán, Veracruz, San Luis Potosí, Nayarit Querétaro, Guanajuato, Puebla, Oaxaca, Hidalgo, Estado de México, e inclusive en algunos cuerpos de agua de la Ciudad de México (Chapultepec y Xochimilco) (Tomasini *et al.*, 2012).

3. ANTECEDENTES

Se realizó la búsqueda de trabajos relacionados con el efecto de la irradiancia luminosa sobre el fitoplancton. Sin embargo, en la mayoría de los documentos se evalúan a la par los efectos de otros factores fisicoquímicos como pH, salinidad o temperatura, por lo que no hay información específica de los efectos de la luz.

De igual forma, se realizó una búsqueda con este mismo factor fisicoquímico al actuar sobre cianobacterias, para conocer acerca de su comportamiento y sus efectos en el desarrollo de los florecimientos algales.

Uno de los trabajos a resaltar es el realizado por Gaskill *et al.*, en 2020, quienes abarcaron no solamente el comportamiento de estos organismos con relación a la luz, sino también evaluaron la forma en que se puede controlar. utilizando polvo de roca glacial redujeron la cantidad de luz en una columna de agua, lo cual provocó una disminución en el biovolumen de cianobacterias en un 78%. Lo cual favoreció el desarrollo de otros organismos como criptofitas por lo que, aunque hubo una disminución de cianobacterias, el biovolumen general de fitoplancton no se vio significativamente afectado.

Dentro de los trabajos específicos de cianobacterias encontramos el realizado por Mutalipassi *et al.*, en 2019, quienes se enfocaron en encontrar las condiciones óptimas para que *Halomicronema metazoicum* desarrollara mayor toxicidad, obteniendo como resultado que al menos en esta especie un alto nivel de irradiancia luminosa provoca una disminución notable en la toxicidad de los organismos. A diferencia de *Microcystis aeruginosa* evaluada por Zheng *et al.*, (2020), la cual dio resultados muy diferentes, concluyendo que las altas temperaturas y los altos niveles de luz provocan una disminución en el crecimiento celular de estos organismos, siendo obligados a compensar esta deficiencia con un aumento en su toxicidad.

Es por eso por lo que (Goncalves *et al.*, 2016), mencionaron que el promedio óptimo de luz diario necesario puede variar de una especie a otra, por lo que los cambios como los anteriormente mencionados pueden deberse exclusivamente a las necesidades de cada especie.

Para los trabajos a realizar, específicamente con las dos cianobacterias de interés para este proyecto, tenemos el consultado en Islam *et al.* (2017) quienes evaluaron de manera individual el comportamiento de las cepas tóxicas y no tóxicas de *M. aeruginosa* y *Anabaena circinalis* bajo condiciones de luz alta, obteniendo como resultado que las cepas tóxicas de ambas especies presentaron una saturación en su crecimiento bajo condiciones altas de luz a diferencia de las cepas no tóxicas. Por lo que concluyen que cada tipo de cepa puede presentar comportamientos distintos en diferentes hábitats con diferente recurso lumínico.

Zhang *et al.*, en 2014, decidieron trabajar con los dos géneros en conjunto, evaluando la competencia que se presenta en un co-cultivo, demostrando que el crecimiento celular de *M. aeruginosa* se verá inhibido por *Anabaena flos-aquae*, debido a los componentes aleloquímicos extracelulares de cada especie. Es decir, por la liberación de compuestos orgánicos con capacidad de afectar el desarrollo biológico de otros organismos Cazón *et al.*, en 2002.

4.JUSTIFICACIÓN

Las cianobacterias al igual que el fitoplancton en general, presentan un rol importante como productores primarios dentro de las redes tróficas y por consiguiente en el correcto funcionamiento de los ecosistemas (Costas & Rodas,2012). Sin embargo su dinámica, estructura y composición se ha visto afectada por las alteraciones que ha generado el cambio climático en los factores fisicoquímicos reconocidos como necesarios para su desarrollo (Winder & Sommer, 2012).

Asi mismo, el aumento de la radiación en los cuerpos de agua ha generado no solo cambios en las estratificación de los mismos (Caballero & Vazquez, 2019) sino también cambios en el acomodo del fitoplancton sobre la columna de agua, generando así variantes en su composición y diversidad debido a los cambios de temperatura y las respuestas celulares que tienen estos organismos bajo condiciones saturadas de luz (Winder & Sommer, 2012).

Es por esto que este trabajo pretende resaltar la importancia de incrementar los trabajos en fotobiología, ya que la incidencia de luz es un factor importante en el desarrollo de las cianobacterias presentando expresiones que pueden variar no sólo de género a otro, también entre especies (Ariño *et al.*, 2021).

5. HIPÓTESIS

- Si los géneros *Anabaena* y *Microcystis* son capaces de aumentar poblacionalmente bajo cualquier intensidad de luz y pudieran verse favorecidos por esa condición, entonces podría observarse si en cocultivo, alguno de los géneros puede verse mayormente beneficiada en su crecimiento e interferir en el desarrollo del otro.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Evaluar la relación mutuamente excluyente de los géneros *Microcystis* y *Anabaena* bajo tres condiciones diferentes de irradiancia luminosa.

6.2 Objetivos particulares

- Analizar el comportamiento en cuanto a crecimiento poblacional de ambos géneros de cianobacterias como respuesta a su exposición a diferentes intensidades de irradiancias lumínicas.
- Identificar si generan cambios morfológicos durante su exposición a cada una de las irradiancias luminosas de manera individual y al encontrarse en competencia.

7. METODOLOGÍA

7.1 Laboratorio

Los organismos empleados en este trabajo se obtuvieron del laboratorio de Microecología ambiental ubicado en la Unidad de Investigación interdisciplinaria en Ciencias de la Salud y la Educación UIICSE-FES Iztacala UNAM. Los cuales fueron aislados de muestras obtenidas anteriormente (2018) en el embalase de Valle de Bravo, Estado de México.

De las muestras proporcionadas por el laboratorio se realizaron monocultivos de cada uno de los géneros de interés mediante el uso de diferentes tratamientos. Dichos tratamientos consistían en la siembra escalonada de los organismos en medio líquido Z8 (**Anexo 12.1**) y en agar-bacteriológico preparado con medio Z8 y con pH modificado a 10 para *Microcystis* sp. y a 8 para *Anabaena* sp (Padedda et al., 2017). Una vez que los monocultivos presentaron crecimiento se continuó con la parte experimental de exposición a diferentes irradiancias luminosas.

La fase experimental consistió de 3 diferentes etapas, la primera para *Anabaena*, la segunda para *Microcystis* y la tercera para evaluar la competencia entre ambas. Cada uno de los tratamientos, incluyendo el grupo control se realizó por triplicado, para ello fueron empleados 36 matraces con 100 mL de medio Z8 cada uno y una concentración inicial de 1×10^5 cel /ml, es decir 12 matraces para cada una de las fases experimentales.

Las irradiancias luminosas empleadas fueron 10, 50 y 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones como parte del experimento y 7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones para el grupo control. Los matraces preparados con los organismos fueron expuestos ante este tipo de estrés durante 20 días con conteos directos cada dos días en microscopio invertido y con cámara de Sedgwick-Rafter.

Debido a que *Microcystis* sp. estaba presente de manera unicelular se realizó un conteo directo a diferencia de *Anabaena* sp. que al encontrarse en filamento tuvo que ser sometida a periodos de sonicación de 7 minutos para facilitar su conteo.

Es importante mencionar que la irradiancia luminosa establecida para el grupo control se determinó mediante la intensidad de irradiancia natural presente en el laboratorio, mientras que las irradiancias seleccionadas para el grupo experimental se establecieron debido a que estos intervalos se encuentran dentro del rango PAR.

Además, se realizaron registros de pH cuando ambas cianobacterias se encontraban en co-cultivo para identificar si se generaban cambios en el ambiente en el que se encontraban. Así como toma de fotografías para llevar un control por si se presentaban cambios morfológicos en los organismos durante los días de exposición.

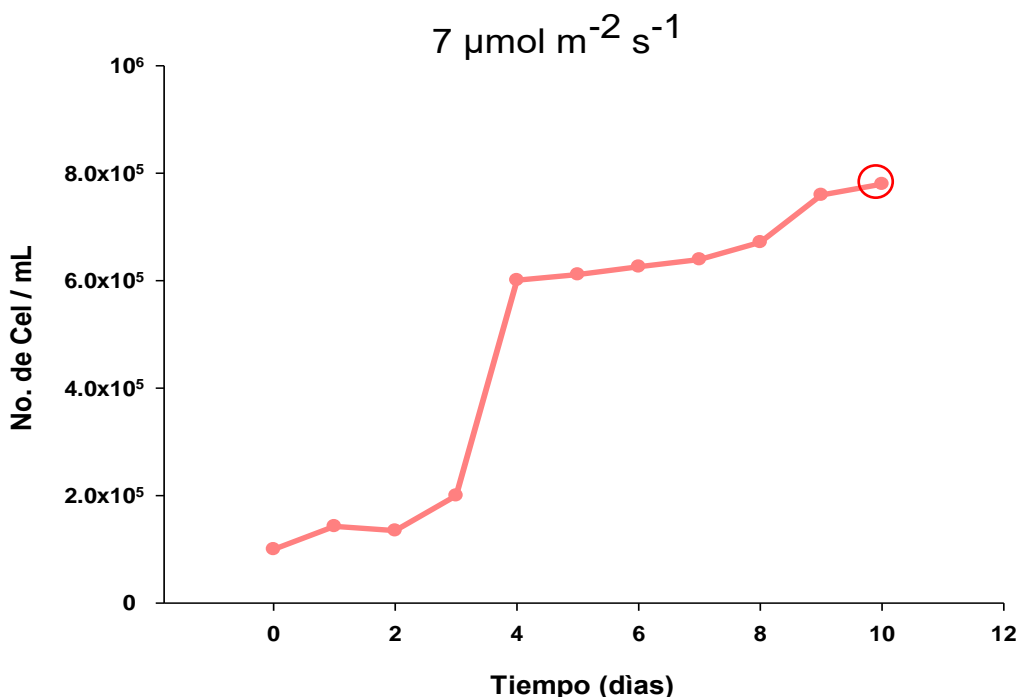
7.2 Gabinete

Con los datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico de ANOVA mediante el uso del programa sigma plot.

8. RESULTADOS

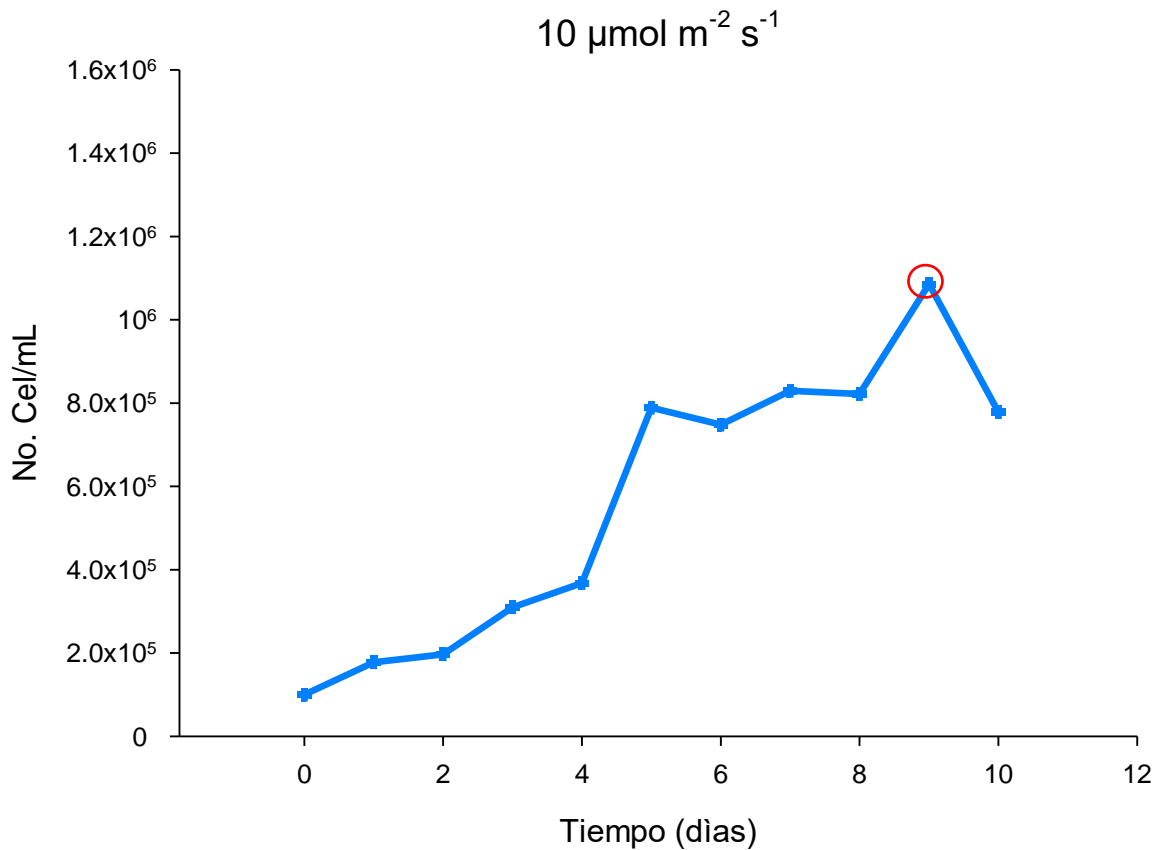
8.1 Crecimiento poblacional de *Anabaena sp.* bajo diferentes intensidades de irradiación luminosa

Las siguientes gráficas representan la relación entre el número de células de *Anabaena sp.* por mililitro a lo largo de 20 días con conteos cada 2 días, bajo cada uno de los diferentes tratamientos de irradiación luminosa, así como en el grupo control.



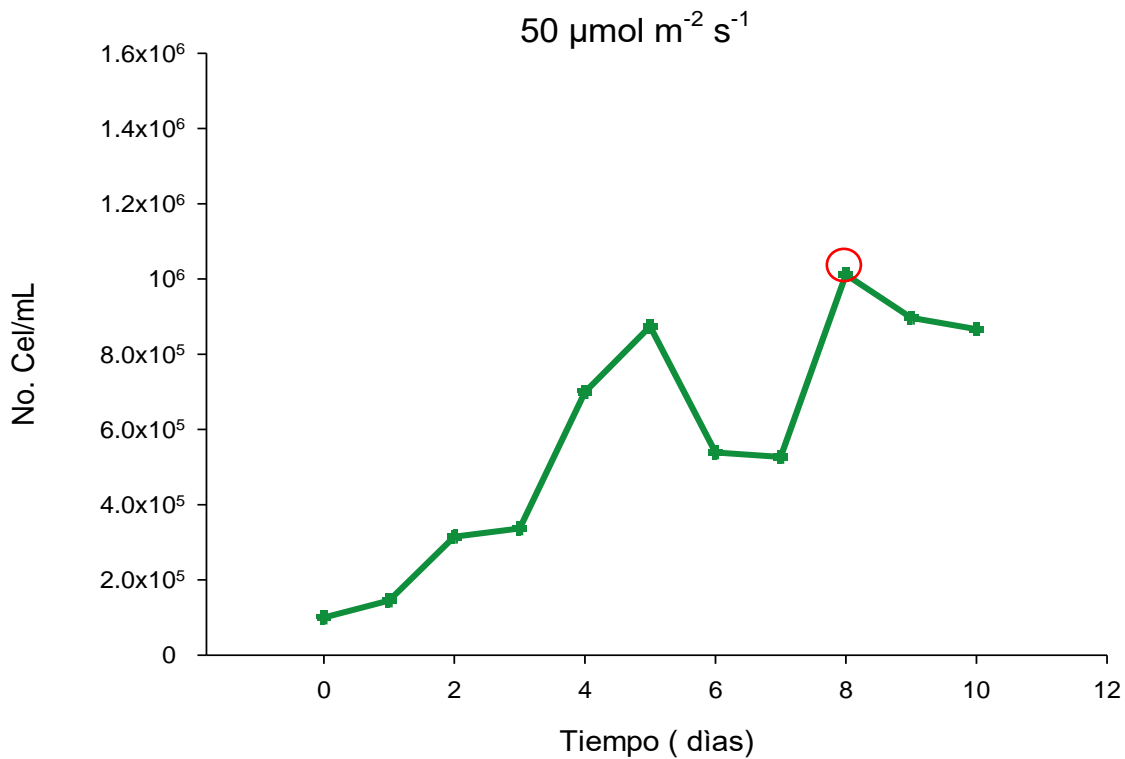
Gráfica 1. Relación entre el aumento de número de células por mL a lo largo de 20 días del grupo control de *Anabaena sp.* bajo una irradiación de $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

Los organismos pertenecientes al grupo control presentaron un crecimiento exponencial a partir del cuarto día con 1.34×10^5 cel/mL hasta el día 20, en el cual se presentó a su vez la concentración máxima con 7.79×10^5 cel/mL, sin presentar declives durante la fase experimental.



Gráfica 2. Relación entre el aumento de número de células de *Anabaena* sp. por mL a lo largo de 20 días bajo el primer tratamiento de $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

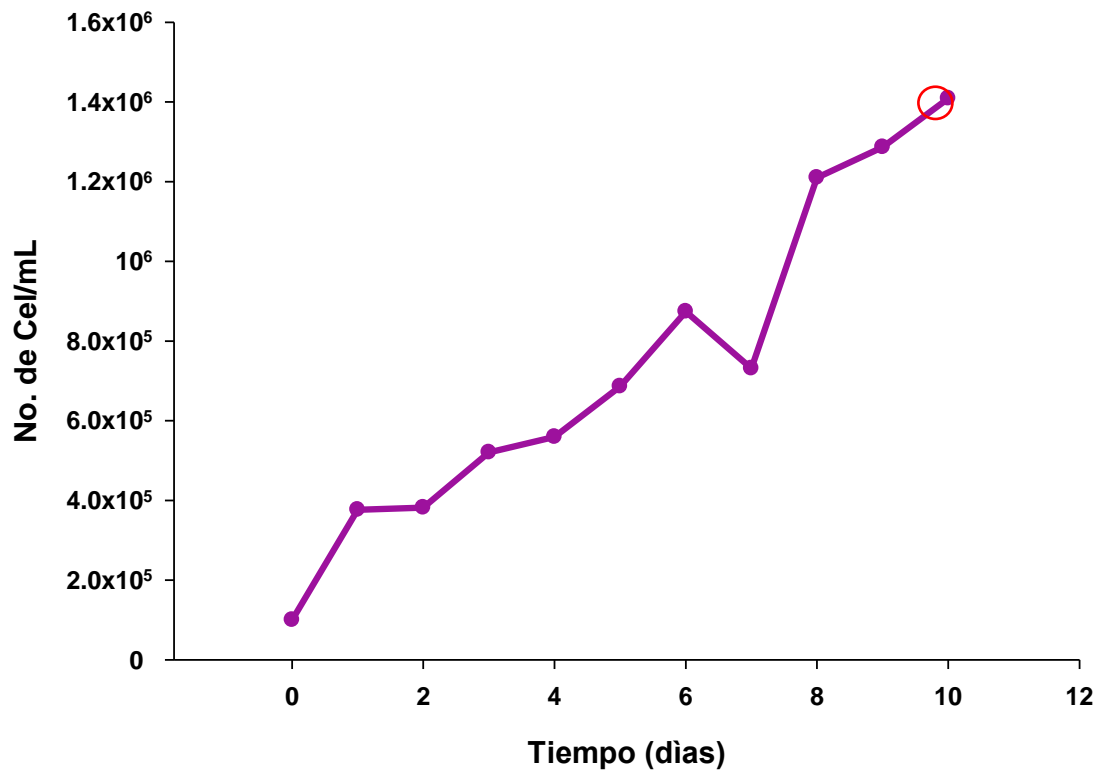
Para el primer tratamiento de exposición a $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones, se presentó un crecimiento exponencial desde el día dos con 1.77×10^5 cel/mL hasta el día 10 con 7.88×10^5 cel/mL, disminuyendo su concentración en el día 12 y en el día 16. Posteriormente aumento de nuevo en el día 18 siendo este el día con mayor concentración celular con 1.2×10^6 cel/mL iniciando su fase de declive en el día 20.



Gráfica 3. Relación entre el aumento de número de células de *Anabaena* sp. por mL a lo largo de 20 días bajo el segundo tratamiento de $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

Los organismos expuestos a $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones fueron el tratamiento en el que se presentaron más cambios en cuanto a crecimiento y descenso poblacional. Presentando un rápido crecimiento exponencial desde el día 1 hasta el día 5 con una gran disminución los días 12 y 14 para posteriormente presentar su máxima concentración celular en el día 16 con 1.0×10^6 cel/mL y a partir de ahí iniciar su fase de declive.

$100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$



Gráfica 4. Relación entre el aumento de número de células de *Anabaena* sp. por mL a lo largo de 20 días bajo el tercer tratamiento de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

Finalmente, en el tratamiento de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones los organismos presentaron un crecimiento exponencial continuo desde el día uno hasta el día 12 con una disminución en el día 14 y un nuevo crecimiento exponencial del día 16 hasta el día 20, siendo este último el día con mayor concentración celular de 1.4×10^6 cel/mL sin una fase de declive evidente durante la fase experimental.

8.2 Resultados morfológicos de *Anabaena* sp.

En cuanto a los cambios morfológicos identificados en los organismos de *Anabaena* sp. bajo las diferentes irradiancias lumínicas, se detectaron variantes al realizar una comparación entre los organismos expuestos a 7 y 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. Bajo la primer irradiancia de 7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones (**Figura 7**) se observó que los filamentos que se desarrollaban eran cortos con un número de células que oscilaba entre 10-20 a diferencia de los expuestos a una irradiancia de 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (**Figura 8**) de fotones, en donde se generaron filamentos más largos, los cuales contenían un número mayor de 50 células por filamento.

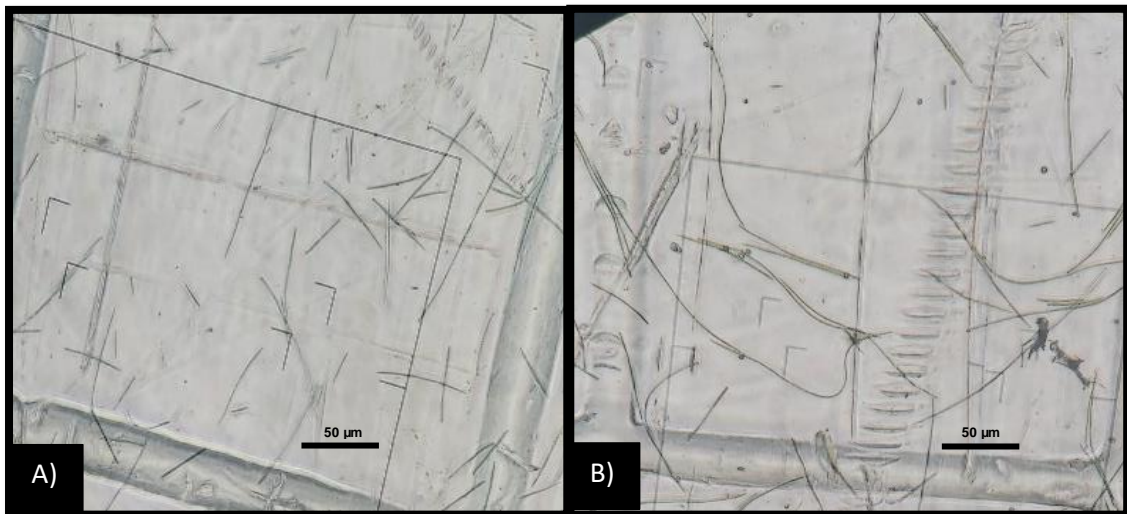
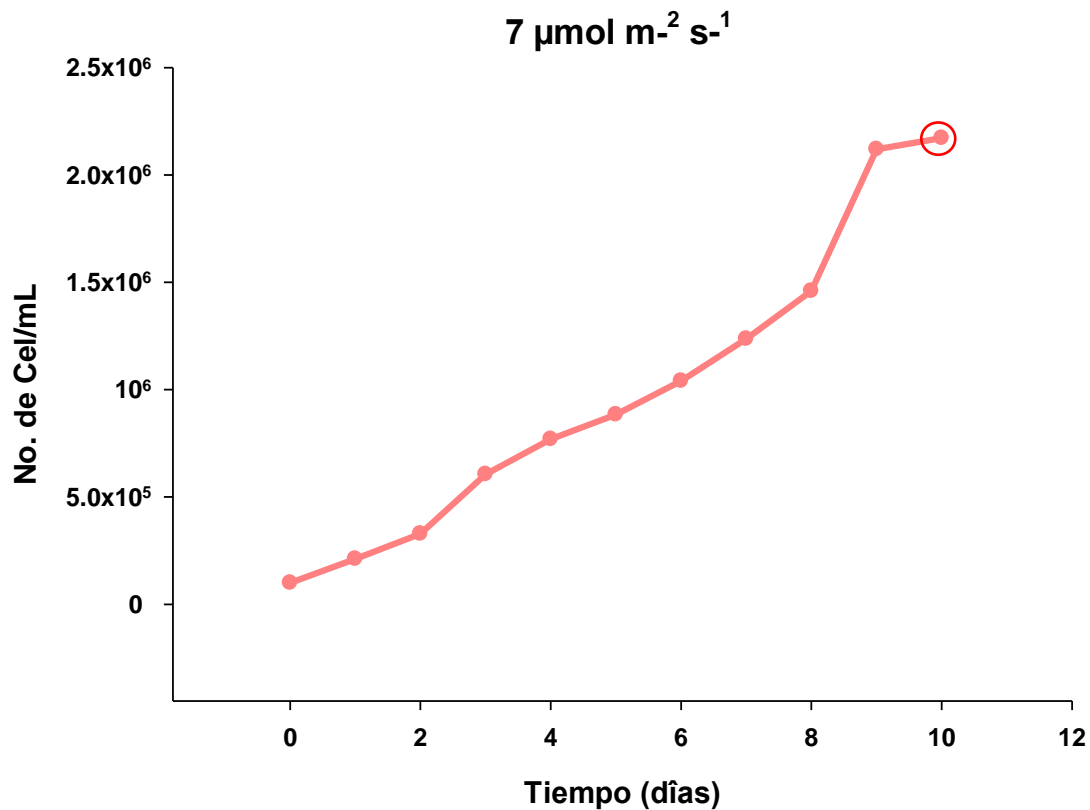


Figura 7. A) Organismos de *Anabaena* sp. expuestos a 7 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de fotones. B) Organismos de *Anabaena* sp. expuestos a 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. Fotografías de autoría propia tomadas a 40x en Microscopio invertido.

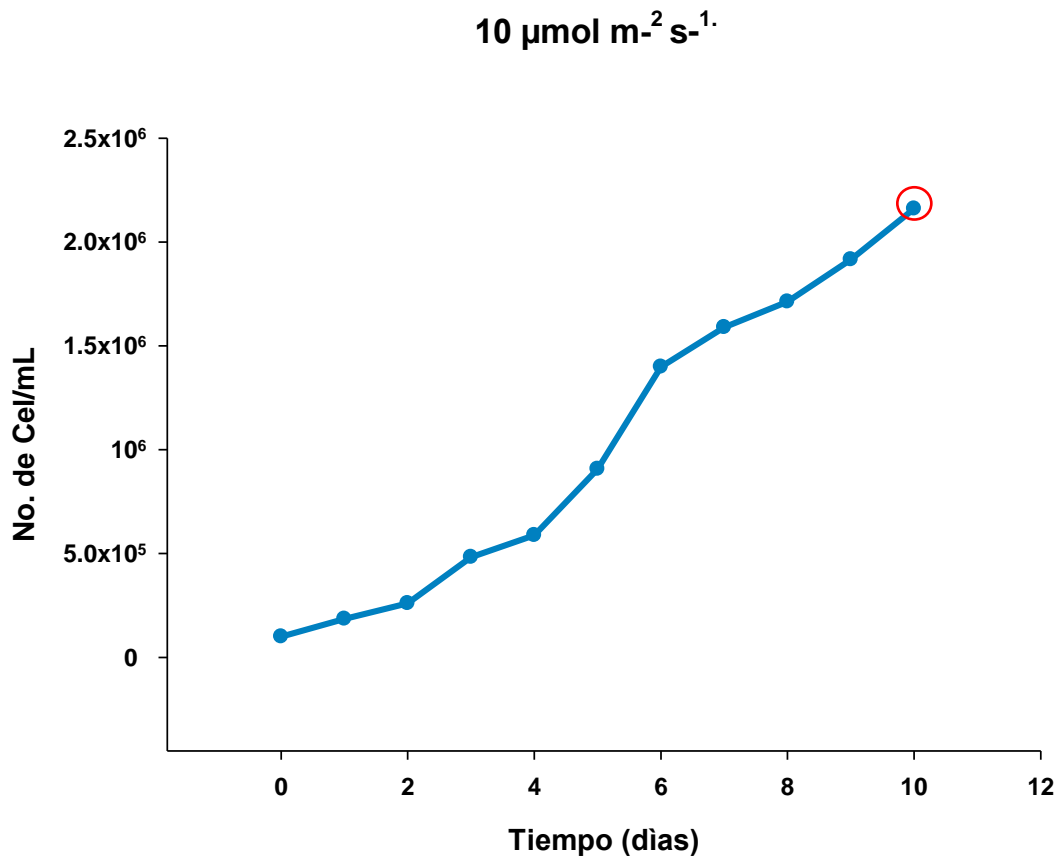
8.3 Crecimiento poblacional de *Microcystis* sp. bajo diferentes intensidades de irradiación luminosa

Las siguientes gráficas representan la relación entre el número de células de *Microcystis* sp. por mililitro a lo largo de 20 días con conteos cada 2 días, bajo cada uno de los diferentes tratamientos de irradiación luminosa, así como en el grupo control.



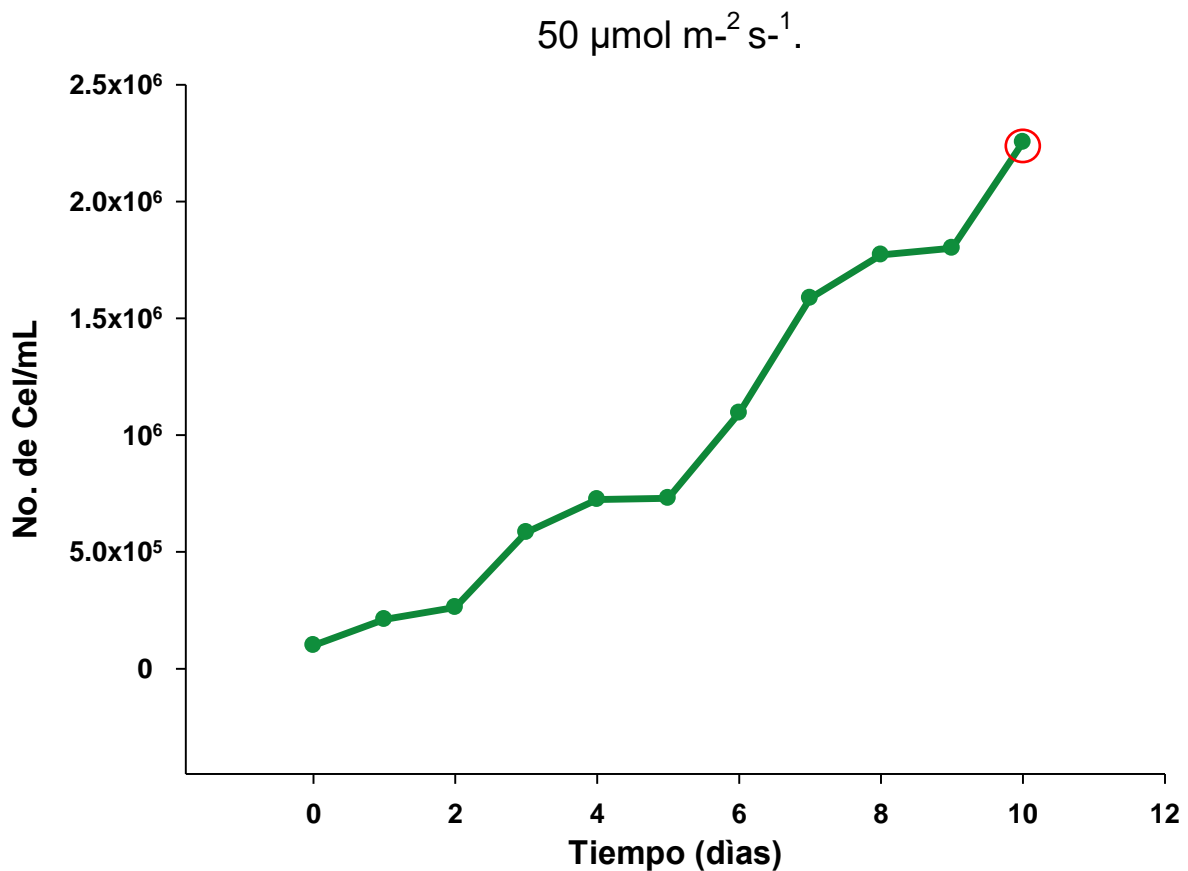
Gráfica 5. Relación entre el aumento de número de células por mL a lo largo de 20 días del grupo control de *Microcystis* sp. bajo una irradiación de $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

Los organismos pertenecientes al grupo control, presentaron un crecimiento poblacional exponencial constante durante los 20 días de estudio. Con la mayor concentración celular en el día 20 con 2.1×10^6 cel/mL sin una fase de declive evidente durante la fase experimental.



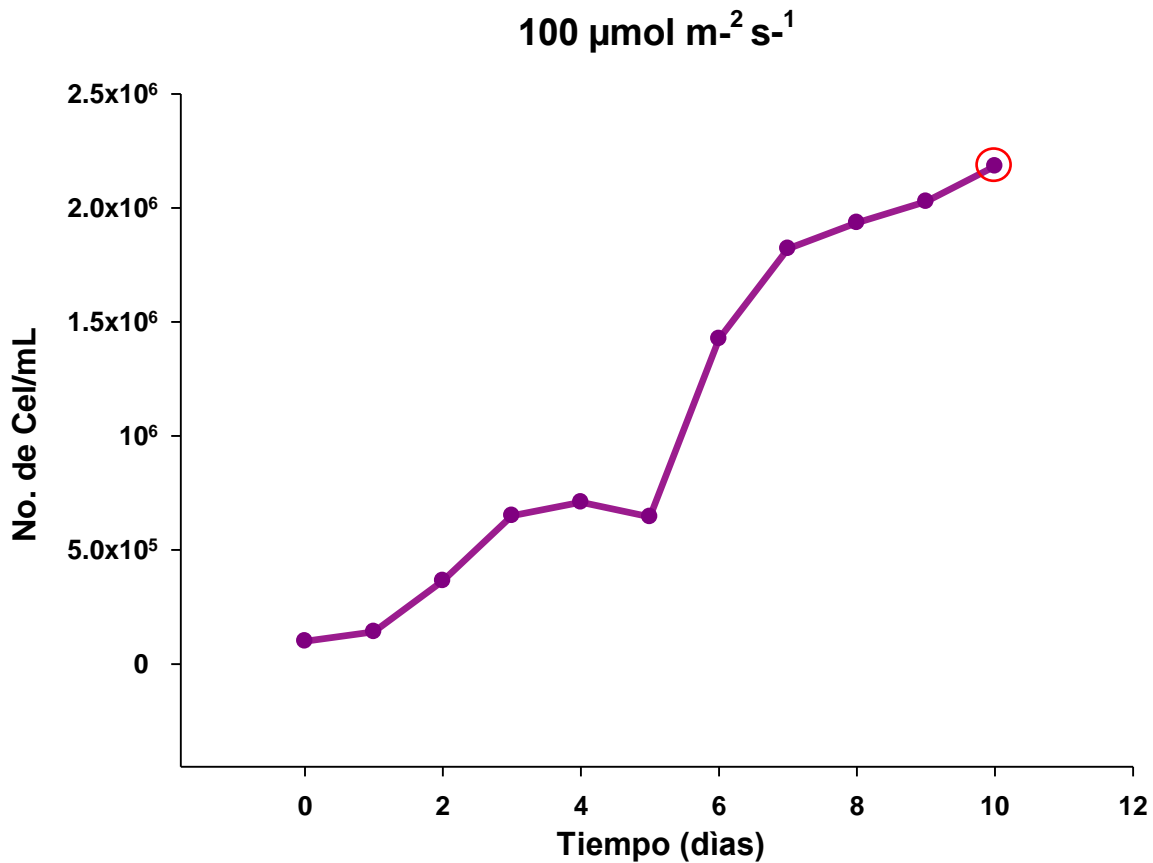
Gráfica 6. Relación entre el aumento de número de células de *Microcystis sp.* por mL a lo largo de 20 días bajo el primer tratamiento de $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

Para el primer tratamiento, en el cual los organismos del género *Microcystis sp.* se encontraron expuestos a $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones se obtuvo un crecimiento exponencial durante los 20 días de estudio con la mayor concentración celular el día 20 con 2.1×10^6 cel/mL sin una fase de declive evidente durante la fase experimental.



Gráfica 7. Relación entre el aumento de número de células de *Microcystis* sp. por mL a lo largo de 20 días bajo el segundo tratamiento de $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

Los organismos expuestos a $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ el cual fue el segundo tratamiento obtuvo como resultado un crecimiento exponencial lento del día 1 hasta el día 8 en donde entró a una fase estacionaria hacia el día 10 con 7.2×10^5 cel/mL para posteriormente incrementar su crecimiento de manera rápida del día 12 hasta el día 20, el cual fue el día con mayor concentración celular 2.2×10^6 cel/mL sin una fase de declive evidente durante la fase experimental.



Gráfica 8. Relación entre el aumento de número de células de *Microcystis* sp. por mL a lo largo de 20 días bajo el tercer tratamiento de 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. En rojo se encuentran señalados los días con mayor concentración celular.

Finalmente, para el tercer tratamiento, el cual fue de mayor intensidad de irradiancia luminosa se presentó un crecimiento exponencial del día 1 hasta el día 8. Posteriormente en el día 10 presentó una disminución, para a partir del día 12 presentar nuevamente un crecimiento exponencial hasta el día 20 en el que también presentó la mayor concentración de células con 2.1×10^6 cel/mL.

8.4 Resultados morfológicos de *Microcystis* sp.

En el género *Microcystis* sp. los cambios morfológicos se identificaron únicamente en los organismos expuestos a mayor irradiancia luminosa la cual fue de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. Se observó que conforme iban aumentando los días de exposición, los organismos que estaban previamente presentes de manera unicelular comenzaron a formar colonias. Es importante mencionar que este tipo de comportamiento no suele ocurrir cuando se encuentran en condiciones de laboratorio.

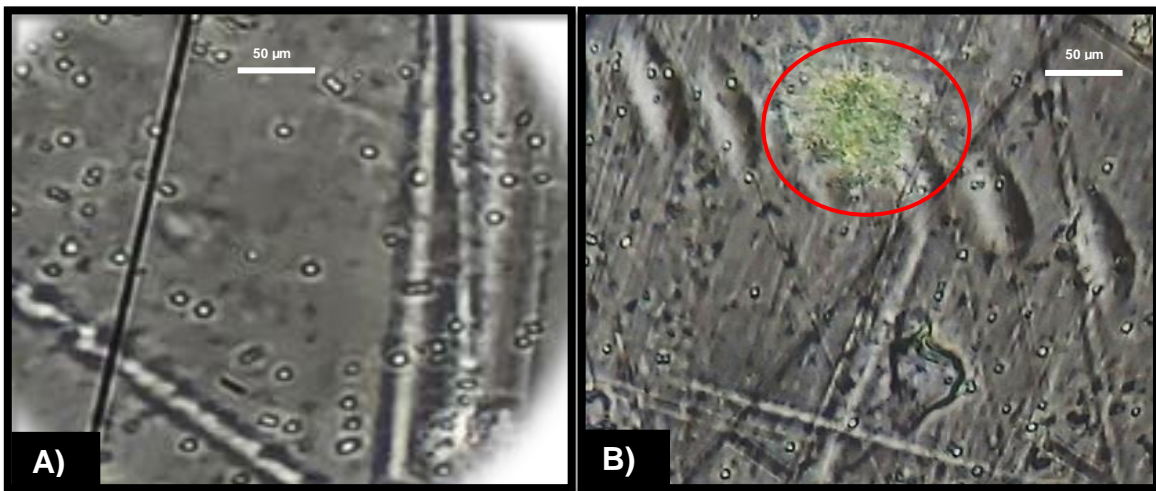
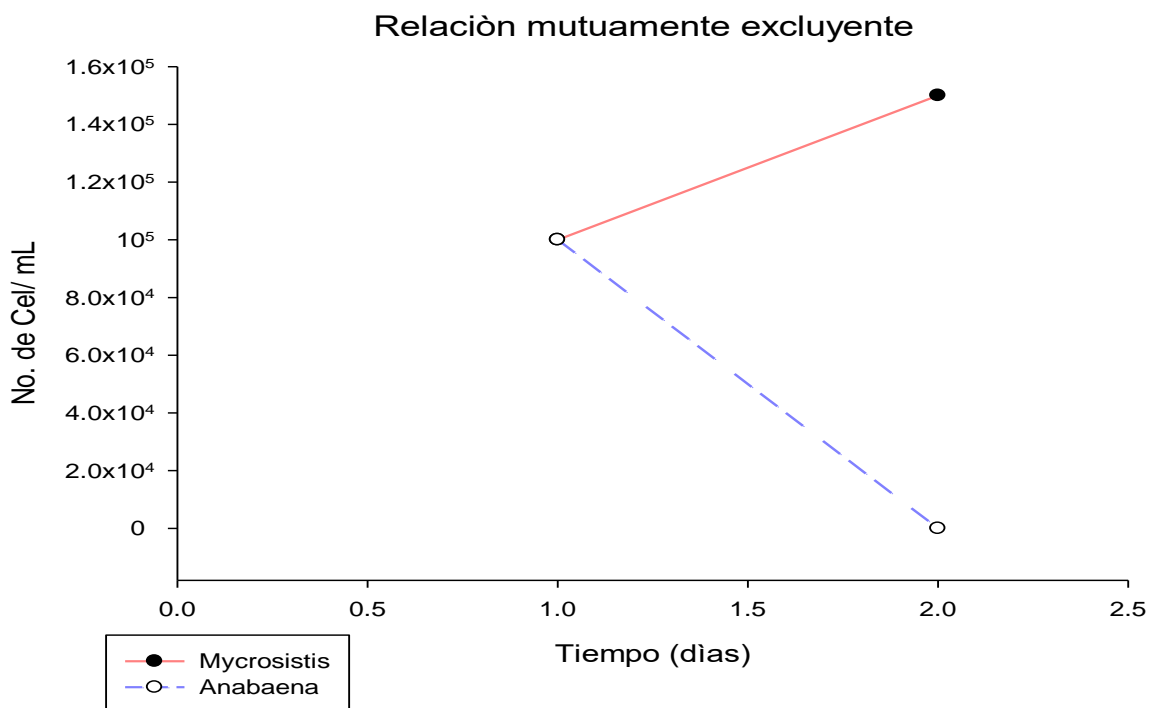


Figura 8. A) Organismos de *Microcystis* sp. en los primeros días de exposición a $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. B) Organismos de *Microcystis* sp. en los últimos días de exposición a $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones. Fotografías de autoría propia tomadas a 60x en Microscopio invertido.

8.3 Resultados de la relación mutuamente excluyente entre ambos géneros.



Gráfica 9. Comportamiento de ambos géneros al encontrarse en competencia.

Para evaluar el comportamiento mutuamente excluyente entre ambos géneros al encontrarse en un mismo medio, se colocó el mismo número de células de ambos géneros en 3 matraces diferentes, los cuales se iban a evaluar durante 20 días con 10 conteos. Sin embargo, desde el día dos se observó una disminución importante en el número de células del género *Anabaena* sp. y para el cuarto día ya no se encontraron organismos de este género, sin embargo el número de células de *Microcystis* sp. continuo en aumento y se identificaron pequeñas colonias.

Asi mismo se registró el cambio de pH que se generó en el día 2 antes de que la total desaparición del género *Anabaena* sp. el cual fue de pH 4.

9. DISCUSIÓN

El desarrollo poblacional de las cianobacterias bajo diferentes irradiancias luminosas, depende principalmente de su capacidad de absorción de luz y la eficacia con la que la convierten en energía (Matthijs *et al.*, 1998). Para ello cuentan con una gran cantidad de fotopigmentos que les permiten aprovechar todo el rango PAR de la luz y que a su vez les confieren mecanismos de fotoadaptación y fotoprotección (Ariño *et al.*, 2021). Sin embargo, este tipo de respuestas pueden variar de un género a otro o inclusive dentro del mismo (Goncalves *et al.*, 2016).

En este trabajo se observó que tanto *Anabaena* sp. como *Microcystis* sp. tienen la capacidad de desarrollarse poblacionalmente bajo cualquiera de las irradiancias luminosas a las que fueron expuestas con una $P=0.2111$, la cual no es significativa. Sin embargo *Anabaena* sp. presentó su máximo número de células por mililitro en $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones, la cual fue la irradiancia más alta a la que se expuso. Este resultado concuerda con los obtenidos por Matthijs *et al.*, en 1998 quienes concluyeron que el género *Anabaena* sp. presenta una mayor tasa de crecimiento bajo condiciones saturadas de luz, debido a la ficocianina. Así como Somma en el 2014 y Jodlowska & Latala en 2010 quienes al trabajar con el Orden *Nostocales* (mismo al que pertenece *Anabaena* sp.), mencionaron que este orden generalmente obtiene mejores tasas de crecimiento a intensidades altas de entre 80 a $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ o inclusive mayores.

Además de presentar mayor crecimiento poblacional a mayor irradiancia luminosa, también se observó que esto provocaba una notable diferencia en la longitud de los filamentos, es decir, que los filamentos presentes en este tratamiento presentaban mayor longitud que los presentes en el grupo control o bien en el primer tratamiento ($10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones). Los reportes en cuanto a las variaciones en longitud de los filamentos de *Anabaena* sp. son escasos, sin embargo, Smith y Gilbert en 1995, realizaron un estudio en condiciones naturales para identificar los principales factores fisicoquímicos que desencadenaban los florecimientos algales y durante su investigación observaron que los cambios en la longitud de los filamentos eran

bastante notorios conforme iba cambiando su posición en la columna de agua. Mencionan que *Anabaena* sp. es un género comúnmente encontrado en el epilimnion, capa en la que suelen estar presentes los filamentos de mayor longitud, y a medida que aumenta la profundidad se encuentra un menor número de filamentos que su vez presentan menor longitud, lo cual relacionan con un posible estrés nutricional.

Sin embargo, Brookes *et al.*, en 1999 mencionan que la longitud de sus filamentos a mayor irradiancia luminosa podría estar relacionado a un mecanismo de defensa contra el estrés de la radiación, explicando que en un filamento con mayor número celular, es más fácil distribuir este recurso y que el daño celular sea menor.

En cuanto a los resultados de *Microcystis* sp. se observó que no hubo gran diferencia en el número de células por mililitro entre las 4 intensidades de irradiancia luminosa, demostrando así, que esta puede desarrollarse de manera constante bajo cualquiera de estas intensidades de luz, es decir, sin verse mayormente favorecida por una u otra. Lo cual varía de lo reportado por Weidner *et al.*, 2003, quienes al evaluar el desarrollo de *Microcystis* sp. en un rango de irradiancia luminosa de 10 a 403 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones observaron que por debajo de 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones el crecimiento es limitado y que necesita irradiancias mayores a este para tener un crecimiento constante.

El desarrollo que presento en bajas irradiancias de luz puede ser explicado con lo mencionado por Ariño *et al.*, 2021, quienes describen que las cianobacterias de estructura unicelular cuentan con mejores estrategias de adaptación. Es decir que en condiciones de baja irradiancia luminosa gracias a la presencia de ficoeritrina, (fotopigmento de gran afinidad a la luz) pueden hacer uso del intervalo espectral de luz verde, comúnmente encontrado en zonas eufóticas, es decir aquellas con baja incidencia de luz.

Mientras que Sommaruga *et al.*, en 2008 mencionaron que en condiciones de alta irradiancia su estrategia de adaptación es la degradación de la ficocianina, así como la producción de mucilago en el cual su principal componente es el ácido D-

galacturónico el cual funciona como protector, lo cual pudo observarse en este trabajo en los organismos expuestos a $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones.

Finalmente se evaluó el comportamiento mutuamente excluyente entre ambos géneros al encontrarse en co-cultivo, para lo cual se esperaba que se cumpliera la hipótesis de que *Anabaena* sp. sería capaz de desplazar a *Microcystis* sp., gracias a los diferentes compuestos aleloquímicos liberados por ambos organismos, dentro de los cuales se encontraron principalmente cedreno y antraceno, según lo reportado por Zhang y *et al.*, en 2014. Sin embargo esta hipótesis fue rechazada debido a que en este estudio el género *Microcystis* sp. desplazó hasta su desaparición en el estudio a *Anabaena* sp. en un periodo de 4 días.

Chía *et al.*, en 2018, obtuvieron un resultado similar al evaluar el comportamiento de ambos géneros al encontrarse en co-cultivo y mencionaron que no solo depende de los componentes alelopáticos que liberen, sino también de la cantidad de nutrientes que se encuentren en el medio y que ambas situaciones son probables debido a la variaciones que existen de una cepa a otra aunque pertenezcan a la misma especie, es decir, pueden presentar efectos inhibitorios o por el contrario incentivar el crecimiento de la otra.

Así mismo, hay otros factores que también pudieron intervenir en el correcto desarrollo de *Anabaena* sp. como el cambio de pH que se registró en el medio en el que se encontraban ambos géneros, el cual fue de 4 cuando reportes como los generados por Padedda *et al.*, en 2017 mencionan que este género requiere de un pH de 8 para su correcto desarrollo. Sin dejar de lado que también fueron identificadas algunas colonias del género *Microcystis* sp. las cuales al producir mucilago pudieron provocar que la incidencia de luz no llegara correctamente al género de *Anabaena* sp que en condiciones limitadas de luz suele presentar dificultades para fijar nitrógeno (Matthijs *et al.* 1998)

10. CONCLUSIÓN

- La irradiancia luminosa es un factor fisicoquímico importante en el desarrollo poblacional de las cianobacterias por su interacción con los fotopigmentos presentes y no solo por incrementar la temperatura.
- *Anabaena* sp. y *Microcystis* sp. son capaces de desarrollarse poblacionalmente bajo cualquier irradiancia luminosa pero solo *Anabaena* sp. se verá mayormente beneficiada por las más altas.
- Ambos géneros presentan cambios morfológicos al ser expuestos a condiciones saturadas de luz.
- En co-cultivo *Microcystis* sp. es capaz de desplazar a *Anabaena* sp. en condiciones de laboratorio.

11. PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran la importancia de los estudios de fotobiología para evaluar el impacto que tiene el aumento de la incidencia de luz provocada por las alteraciones del cambio climático sobre los organismos. En esta ocasión nos enfocamos únicamente en cianobacterias, sin embargo es necesario evaluar si otros organismos vegetales presentan también este tipo de alteraciones.
- En cuanto a proyectos con cianobacterias se recomienda generar nuevos estudios de exposición a diferentes irradiancias lumínicas, realizando también los estudios correspondientes de determinación de pigmentos.
- Así como la determinación de los compuestos aleloquímicos secretados por ambas cianobacterias al encontrarse en competencia con otros organismos.

11. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, A., Echenique, R. O., & Hansen, M. (2011). Consideraciones generales de Cyanobacteria: aspectos ecológicos y taxonómicos. Serie: Temas de Salud Ambiental, 5.

Ariño, A. T., de Dios, M. A. H., & López, G. C. (2021). Efecto de la irradiancia en el crecimiento y coloración de la cianobacteria marina *Spirulina subsalsa* Oersted ex Gomont, 1892. AquaTechnica: Revista Iberoamericana de Acuicultura., 3(1), 25-36.

Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología (Bogotá, Colombia). 96p.

Becker, V., Ihara, P., Yunes, J. S., & Huszar, V. L. M. (2010). Occurrence of anatoxin-a (s) during a bloom of *Anabaena crassa* in a water-supply reservoir in southern Brazil. Journal of Applied Phycology, 22(3), 235-241.

Boddula, V., Ramaswamy, L., Pasumarthi, R., & Mishra, D. (2016, October). Data driven analysis of Algal Bloom activity for effective Water Sustainability. In 2016 IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom)(BDCloud-SocialCom-SustainCom) (pp. 424-430). IEEE

Brookes, J. D., Ganf, G. G., Green, D., & Whittington, J. (1999). The influence of light and nutrients on buoyancy, filament aggregation and flotation of *Anabaena circinalis*. Journal of plankton research, 21(2).

Caballero, M., & Vázquez, G. (2019). Lagos como sensores de cambio climático: el caso de La Alberca de Tacámbaro, Michoacán, México. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 22.

- Calderon-Díaz, I., Trujillo-Tapia, M. N., & Ramírez-Fuentes, E. (2014). ¿Cianobacterias que comen petróleo? *Ciencia y Mar*, 22(54), 47-52.
- Callejas, M. C. (2007). Metabolismo del nitrógeno en cianobacterias formadoras de heterocistos.
- Cazón, A., de Viana, M. L., & Gianello, J. C. (2002). Comparación del efecto fitotóxico de aleloquímicos de *Baccharis boliviensis* (Asteraceae) en la germinación de *Trichocereus pasacana* (Cactaceae). *Ecología austral*, 12(1), 73-78.
- Ceballos-Laita, L., Calvo-Begueria, L., Lahoz, J., Bes, M. T., Fillat, M. F., & Peleato, M. L. (2015). γ -Lindane increases microcystin synthesis in *Microcystis aeruginosa* PCC7806. *Marine Drugs*, 13(9), 5666-5680.
- Chen, J., Brissette, F. P., & Lucas-Picher, P. (2016). Transferability of optimally-selected climate models in the quantification of climate change impacts on hydrology. *Climate Dynamics*, 47(9), 3359-3372.
- Chia, M. A., Jankowiak, J. G., Kramer, B. J., Goleski, J. A., Huang, I. S., Zimba, P. V., ... & Gobler, C. J. (2018). Succession and toxicity of *Microcystis* and *Anabaena* (*Dolichospermum*) blooms are controlled by nutrient-dependent allelopathic interactions. *Harmful algae*, 74, 67-77.
- Codd, G. A., Meriluoto, J., & Metcalf, J. S. (2016). Introduction: Cyanobacteria, cyanotoxins, their human impact, and risk management. *Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis*, 1-8.
- Costas, E., & Rodas, V. L. (2011, April). El papel del fitoplancton en el cambio climático: ¿cuánto depende nuestro destino de unas pequeñas microalgas?. In *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* (Vol. 77, No. 1).
- Fernández, J. A., Nieto, P. G., Torres, J. M., & Muñoz, C. D. (2013). Analysis of cyanotoxins presence from experimental cyanobacteria concentrations in the Trasona reservoir (northern Spain) using support vector regression. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 14(2), 103-112.

Gaskill, J. A., Harris, T. D., & North, R. L. (2020). Phytoplankton Community Response to Changes in Light: Can Glacial Rock Flour Be Used to Control Cyanobacterial Blooms?. *Frontiers in Environmental Science*.

Gonçalves, A. L., Pires, J. C., & Simoes, M. (2016). The effects of light and temperature on microalgal growth and nutrient removal: an experimental and mathematical approach. *RSC advances*, 6(27), 22896-22907.

Gugger, M., Lyra, C., Henriksen, P., Coute, A., Humbert, J. F., & Sivonen, K. (2002). Phylogenetic comparison of the cyanobacterial genera *Anabaena* and *Aphanizomenon*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 52(5), 1867-1880.

Huang, T. L., Li, X., Ma, W. X., Qin, C. H., & Zhang, Y. T. (2014). Dynamic characteristics of nutrients and causal analysis in eutrophic reservoir: a case study of Shibianyu reservoir. *Desalination and Water Treatment*, 52(7-9), 1624-1635.

Islam, M. A., & Beardall, J. (2017). Growth and photosynthetic characteristics of toxic and non-toxic strains of the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena circinalis* in relation to light. *Microorganisms*, 5(3), 45.

Jodłowska, S., Latała, Adam (2010). *Photoacclimation strategies in the toxic cyanobacterium Nodularia spumigena (Nostocales, Cyanobacteria)*. *Phycologia*, 49(3), 203–211. doi:10.2216/PH08-14.1

Kirilov Kirjakov, I., & Naneva Velichkova, K. (2016). A new cyanobacterial species of *Anabaena* genus (*Nostocales, Cyanobacteria*) from Bulgaria. *Anales de Biología* vol. 38, 2016.

Komárek, J., & Komárková, J. (2002). Review of the European *Microcystis* morphospecies (Cyanoprokaryotes) from nature. *Fottea*, 2(1), 1-24.

Kurmayer, R., Sivonen, K., Wilmotte, A., & Salmaso, N. (Eds.). (2017). Molecular tools for the detection and quantification of toxigenic cyanobacteria. John Wiley & Sons.

Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O., & Gay, C. (2014). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. México: una visión hacia el siglo XXI. *El cambio climático en México*, 15-21.

Matthijs, H. C., Von Elert, E. R. I. C., & Mur, L. R. (1998). Comparison of the light-limited growth of the nitrogen-fixing cyanobacteria *Anabaena* and *Aphanizomenon*. *The New Phytologist*, 138(4), 579-587.

Meriluoto, J., Spoof, L., & Codd, G. A. (Eds.). (2017). Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis. John Wiley & Sons.

Mora Orozco, C. D. L., Flores López, H. E., Durán Chávez, Á., & Ruiz Corral, J. A. (2011). Climate change and the impact on the concentration of dissolved oxygen in Lake Chapala. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), 381-394.

Mutalipassi, M., Mazzella, V., Romano, G., Ruocco, N., Costantini, M., Glaviano, F., & Zupo, V. (2019). Growth and toxicity of *Halomicronema metazoicum* (Cyanoprokaryota, Cyanophyta) at different conditions of light, salinity and temperature. *Biology open*, 8(10), bio043604.

Namsaraev, Z., Melnikova, A., Komova, A., Ivanov, V., Rudenko, A., & Ivanov, E. (2020). Algal bloom occurrence and effects in Russia. *Water*, 12(1), 285.

Otsuka, S., Suda, S., Li, R., Matsumoto, S., & Watanabe, M. M. (2000). Morphological variability of colonies of *Microcystis* morphospecies in culture. *The Journal of general and applied microbiology*, 46(1), 39-50.

Padedda, B. M., Sechi, N., Lai, G. G., Mariani, M. A., Pulina, S., Sarria, M., ... & Luglie, A. (2017). Consequences of eutrophication in the management of water resources in Mediterranean reservoirs: A case study of Lake Cedrino (*Sardinia, Italy*). *Global Ecology and Conservation*, 12, 21-35.

Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial ecology*, 65(4), 995-1010.

Pérez, D. S., Soraci, A. L., & Tapia, M. O. (2008). Cianobacterias y cianotoxinas: Rol de las microcistinas en la salud humana y animal y su detección en muestras de agua.

Pineda-Mendoza, R., Martínez-Jerónimo, F., Garduño-Solórzano, G., & Olvera-Ramírez, R. (2011). Caracterización morfológica y molecular de cianobacterias filamentosas aisladas de florecimientos de tres lagos urbanos eutróficos de la ciudad de México. *Polibotánica*, (31), 31-50.

Prasanna, R., Kumar, R., Sood, A., Prasanna, B. M., & Singh, P. K. (2006). Morphological, physiochemical and molecular characterization of *Anabaena* strains. *Microbiological research*, 161(3), 187-202.

Rajaniemi, P., Hrouzek, P., Kaštovska, K., Willame, R., Rantala, A., Hoffmann, L., & Sivonen, K. (2005). Phylogenetic and morphological evaluation of the genera *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Trichormus* and *Nostoc* (*Nostocales*, *Cyanobacteria*). *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 55(1), 11-26.

Rigosi, A., Carey, C. C., Ibelings, B. W., & Brookes, J. D. (2014). The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa. *Limnology and Oceanography*, 59(1), 99-114

Roset, J., Aguayo, S., & Muñoz, M. J. (2001). Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. *Revista de Toxicología*, 18(2), 65-71.

Salazar-Alcaraz, I., Ochoa-Zamora, G. G., Hernandez-Almeida, O. U., Palomino-Hermosillo, Y. A., Leyva-Valencia, I., Romero-Banuelos, C. A., & Cepeda-Morales, J. (2021). Evaluación polifásica de las cianobacterias *Limnographis robusta* (*Oscillatoriaceae*) y *Microcystis aeruginosa* (*Microcystaceae*), formadoras de florecimientos en un lago crater subtropical mexicano. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92, e923485.

Sanseverino, I., Conduto, D., Pozzoli, L., Dobricic, S., & Lettieri, T. (2016). Algal bloom and its economic impact. *European Commission, Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability*.

Shan, K., Shang, M., Zhou, B., Li, L., Wang, X., Yang, H., & Song, L. (2019). Application of Bayesian network including *Microcystis* morphospecies for

microcystin risk assessment in three cyanobacterial bloom-plagued lakes, China. *Harmful Algae*, 83, 14-24.

Sharma, N. K., Rai, A. K., & Stal, L. J. (2013). Cyanobacteria: an economic perspective. John Wiley & Sons.

Shevela, D., Pishchalnikov, R. Y., & Eichacker, L. A. (2013). Oxygenic photosynthesis in cyanobacteria (pp. 3-40). Boca Raton: CRC Press.

Smith, A. D., & Gilbert, J. J. (1995). Spatial and temporal variability in filament length of a toxic cyanobacterium (*Anabaena affinis*). *Freshwater Biology*, 33(1), 1-11.

Somma, A. (2014). El papel de la luz y la temperatura en la dinámica de cianobacterias en un lago de uso recreativo.

Sommaruga, R.;Chen, Y;Liu ,Z.(2009). *Multiple Strategies of Bloom-Forming Microcystis Minimize Damage by Solar Ultraviolet Radiation in Surface Waters.* , 57(4), 667–674. doi:10.1007/s00248-008-9425-4.

Stadtländer, C. T. H. (2013). EG Bellinger, DC Sigeo (2010). Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators. *Journal of Applied Phycology*, 25(4), 1265-1266.

Tomasini Ortiz, C., Moeller Chávez, G., Sánchez Chávez, J., & Bravo Inclán, L. (2012). Cianobacterias y cianotoxinas en el lago de Pátzcuaro, Michoacán, México.

Tripathi, S. N., Chung, I. K., & Lee, J. A. (2007). Diversity and characteristics of terrestrial cyanobacteria near gimhae city, Korea. *Journal of Plant Biology*, 50(1), 50-59.

Uribe, A. N. C. (2019). Estudio de los cuerpos lénticos en el escenario de cambio climático, una mirada a Colombia. *Revista Pertinencia Académica*. ISSN 2588-1019, 3(3), 29-50.

Useros Fernández, J. L. (2013). Climate change: Causes and environmental effects. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71-98.

Wang, S., Jiao, Y., & Rao, Z. (2021). Selective removal of common cyanotoxins: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.

Wiedner C, Visser PM, Fastner J, Metcalf JS, Codd GA, Mur LR. 2003. Effects of light on the microcystin content of *Microcystis* strain PCC 7806. *Appl Environ Microbiol.* 69:1475-1481

Zhang, X. W., Fu, J., Song, S., Zhang, P., Yang, X. H., Zhang, L. R., & Zhu, H. L. (2014). Interspecific competition between *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena flos-aquae* from Taihu Lake, China. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 69(1-2), 53-60.

Zheng, T., Zhou, M., Yang, L., Wang, Y., Wang, Y., Meng, Y., & Zuo, Z. (2020). Effects of high light and temperature on *Microcystis aeruginosa* cell growth and β -cyclocitral emission. *Ecotoxicology and environmental safety*, 192, 110313.

12. ANEXOS

12.1 Medio de cultivo Z8 (Staub 1961, Kotai1972,NIVA 1976)

1. Stock I NaNo ₃ 46.7 g Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O 5.9 g MgSO ₄ •4H ₂ O 2.5 g Aforar en 1L de dH ₂ O	2. Stock II K ₂ HPO ₄ 3.1 g Na ₂ CO ₃ 2.1 g Aforar en 1L de dH ₂ O
3. Stock III 1.Sln Fe FeCl ₃ •6H ₂ O disuelto en 100ml 0.1 NHCl 2.Sln EDTA EDTA-Na ₂ disuelto en 100mL 0.1 NaOH 10 ml de Fe solución disueltos en 900 mL dH ₂ O Agregar 9.5 mL de EDTA Aforar en 1L de dH ₂ O	4. Stock IV 1.NaWO ₄ •2H ₂ O 0.330 g/ 100mL 2.(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ •4H ₂ O 0.880 g/ 100mL 3.KBr 1.20 g/ 100mL 4.KI 0.83 g/ 100mL 5.ZnSO ₄ •7H ₂ O 2.87 g/ 100mL 6.Cd(NO ₃) ₂ •4H ₂ O 1.55 g/ 100mL 7.Co(NO ₃) ₂ •6H ₂ O 1.46 g/ 100mL 8.CuSO ₄ •5H ₂ O 1.25 g/ 100mL 9.NiSO ₄ (NH ₄) ₂ SO ₄ •6H ₂ O 1.98 g/ 100mL 10.Cr(NO ₃) ₃ •9H ₂ O 0.410 g/ 100mL 11.V ₂ O ₅ 0.089 g/ 100mL 12.Al ₂ (SO ₄) ₃ K ₂ SO ₄ •2H ₂ O 4.74 g/ 100mL H ₃ BO ₃ 31.0 g/ 100mL 13.MnSO ₄ •4H ₂ O 22.3g/ 100mL Agregar 1mL de las soluciones 1-10 y 12, Despues 10mL de la solución 11 y 13 a 700mL de dH ₂ O Aforar en 1L de dH ₂ O

Preparación final

Burbujear 500mL dH₂O con CO₂ gas por 30 minutos

Agregar:

10 mL de solución I

10 mL de solución II

10 mL de solución III

1 mL de solución IV

Aforar en 1L de dH₂O

12.2 Conteo celular (cel/mL) de *Anabaena* sp. bajo las 3 diferentes irradiancias luminosa y el grupo control durante los 10 conteos

Día	7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones (control)	10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones	50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones	100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones
0	100,000	100,000	100,000	100,000
1	142,667	177,567	145,333	376,667
2	134,600	196,900	314,667	382,000
3	200,000	309,567	336,667	520,667
4	600,667	367,567	699,333	559,333
5	611,333	788,900	874,000	686,000
6	626,000	748,233	538,667	874,000
7	639,333	829,567	526,667	731,333
8	671,333	821,567	1,011,333	1,210,000
9	759,333	1,085,567	896,667	1.286.667
10	779,667	778,233	866,667	1,408,667

12.3 Conteo celular (cel/mL) de *Microcystis* sp. bajo las 3 diferentes irradiancias luminosa y el grupo control durante los 10 conteos

Día	7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones	10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones	50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones	100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fotones
0	100,000	100,000	100,000	100,000
1	211.367	185.033	211.600	141.067
2	328.633	260.500	262.600	364.767
3	606.000	482.567	584.000	649.967
4	769.167	587.800	724.633	709.767
5	883.433	906.567	729.933	645.633
6	1.040.667	1.398.933	1.094.267	1.425.467
7	1.236.100	1.589.200	1.586.200	1.821.333
8	1.459.333	1.712.567	1.771.600	1.935.267
9	2.119.567	1.915.467	1.800.367	2.027.300
10	2.171.900	2.159.533	2.253.733	2.182.700

P= 0.2111 No significativo