



Universidad de Concepción



Evaluación de variables físicas y químicas que explican el desarrollo de floraciones algales de *Microcystis* en la Laguna Lo Galindo, a través de la modelación numérica

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

JORGE EDUARDO BALVOA LUENGO

CONCEPCION (Chile), 2017



Universidad de Concepción



Evaluación de variables físicas y químicas que explican el desarrollo de floraciones algales de *Microcystis* en la Laguna Lo Galindo, a través de la modelación numérica

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

JORGE EDUARDO BALVOA LUENGO

Profesor guía: **Roberto Urrutia**

Profesor Co-guía: **Diego Caamaño**



**“EVALUACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS QUE EXPLICAN
EL DESARROLLO DE FLORACIONES ALGALES DE MICROCYSTIS EN
LA LAGUNA LO GALINDO, A TRAVÉS DE LA MODELACIÓN
NUMÉRICA”**

PROFESOR GUÍA: DR. ROBERTO URRUTIA PÉREZ
PROFESOR CO - GUÍA: DR. DIEGO CAAMAÑO AVENDAÑO
PROFESORA COMISIÓN: DRA. ANA CAROLINA BAEZA FREER
PROFESOR COMISIÓN: DR. RICARDO FIGUERA JARA

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

CONCEPCIÓN, JUNIO DE 2017

ÍNDICE

Índice Tablas.....	ii
Índice Figuras.....	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. HIPÓTESIS.....	6
3. OBJETIVOS.....	6
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
4. ANTECEDENTES.....	7
4.1. FLORACIONES ALGALES.....	7
4.1.1. EFECTOS DE FLORACIONES ALGALES.....	8
4.1.2. CAUSAS DE LAS FLORACIONES ALGALES.....	10
4.2. FLORACIONES ALGALES DE CIANOBACTERIAS.....	12
4.2.1. MECANISMOS FÍSICOS DE FORMACIÓN DE BLOOM.....	13
4.2.2. MECANISMOS DE OBTENCIÓN DE NUTRIENTES.....	15
4.2.3. FLORACIONES DE MICROCYSTIS.....	17
5. METODOLOGÍA.....	20
5.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
5.2. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA DISPONIBLE.....	23
5.2.1. METEOROLOGÍA, BATIMETRÍA Y NIVELES DEL AGUA.....	23
5.2.2. ÁREAS DE DRENAJE.....	24
5.2.3. CALIDAD DE AGUA.....	24
5.3. MODELACIÓN NUMÉRICA.....	25
5.3.1. TIPOS DE MODELOS UTILIZADOS EN FLORACIONES ALGALES.....	25
5.3.2. MODELO DELFT3D.....	27
5.4. PROCESOS DE MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.....	31
5.4.1. ECUACIONES HIDRODINÁMICAS.....	32
5.4.2. CONFIGURACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO.....	35
5.4.3. PROCESOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO.....	38
5.5. PROCESO DE MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUA Y ECOLÓGICA.....	40
5.5.1. ECUACIONES DE CALIDAD DE AGUA.....	41
5.5.2. ECUACIONES ECOLÓGICAS.....	43

5.5.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD Y ECOLÓGICO.....	49
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	51
6.1. CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA A DE LAGUNA LO GALINDO.	51
6.1.1. ESTADO TRÓFICO.	51
6.1.2. NUTRIENTES.....	51
6.1.3. FACTORES FÍSICO-QUÍMICOS.	52
6.1.4. FACTORES METEOROLÓGICOS.	54
6.2. MODELACIÓN.	57
6.2.1. CÁLCULOS REQUERIDOS Y SUPUESTOS UTILIZADOS.....	57
6.2.2. CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA.....	61
6.2.3. VALIDACIÓN HIDRODINÁMICA.	64
6.2.4. VALIDACIÓN DE CALIDAD DE AGUA Y ECOLÓGICA.....	66
6.3. PATRONES DE MEZCLA.	69
6.3.1. NIVEL DEL AGUA.	69
6.3.2. VELOCIDAD DE FLUJO.	70
6.3.3. TEMPERATURA DEL AGUA.	71
6.4. PATRONES DE MICROCYSTIS.	72
7. CONCLUSIONES.....	78
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
9. ANEXOS.....	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Registro de aparición de floraciones algales en Laguna Lo Galindo.....	3
Tabla 2. Floraciones algales de cianofíceas y cianotoxinas en Laguna Lo Galindo.	3
Tabla 3. Estado trófico de laguna Lo Galindo a través del índice de Carlson (1977).....	4
Tabla 4. Efectos de la Floración Algal sobre los sistemas acuáticos.	9
Tabla 5. Factores que influyen en la generación de floraciones algales.	10
Tabla 6. Principales Géneros de Cianobacterias formadoras de floraciones algales.	13
Tabla 7. Mecanismos de obtención de nutrientes y otras moléculas en Cianobacterias.	16
Tabla 8. Caracterización de cianotoxinas y efectos en humanos.....	19
Tabla 9. Áreas de drenaje de Laguna Lo Galindo.	21
Tabla 10. Características morfométricas de laguna Lo Galindo.	21
Tabla 11. Usos de suelo de la cuenca directa aportante a la laguna Lo Galindo.....	22
Tabla 12. Caracterización de modelos utilizados en el estudio de Bloom.....	26

Tabla 13. Criterio de ajuste de Cost Function (Cx).....	39
Tabla 14. Estado trófico 2011-2014, según guía CONAMA.....	51
Tabla 15. Nutrientes presentes en Laguna Lo Galindo, 2011-2014.....	52
Tabla 16. Relación de N-P presente en Laguna Lo Galindo, 2011-2014.....	52
Tabla 17. Otros parámetros en Laguna Lo Galindo, 2011-2014.....	54
Tabla 18. Estadísticos en Calibración.....	63
Tabla 19. Estadísticos en Validación.....	66
Tabla 20. Coeficientes de correlación sobre el parámetro ingresados al modelo.....	74
Tabla 21. Coeficientes de correlación sobre el parámetro calculados del modelo.....	75
Tabla 22. Coeficientes de correlación sobre el parámetro ingresados al modelo.....	77
Tabla 23. Coeficientes de correlación sobre el parámetro calculados del modelo.....	77
Tabla 24. Parámetros para determinar estados tróficos de los lagos chilenos.....	90

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de los factores, causas y efectos de las floraciones algales.....	8
Figura 2. Dinámica de formación de bloom en cianobacterias.....	15
Figura 3. Morfología de Microcystis y bloom de Microcystis.....	17
Figura 4. Área de estudio y lago Lo Galindo.....	20
Figura 5. Diagrama de flujo para obtener concentración de fitoplancton en DELFT3D.....	28
Figura 6. Esquema simplificado de las etapas de la modelación hidrodinámica.....	31
Figura 7. Esquema simplificado de las etapas de la modelación de bloom algal.....	40
Figura 8. Esquema general del modelo de Calidad DELFT3D- WAQ.....	42
Figura 9. Precipitaciones medias mensuales (2011-2013).....	55
Figura 10. Velocidades medias diarias de viento (2011-2013).....	56
Figura 11. Direcciones medias diarias de viento (2011-2013).....	56
Figura 12. Temperaturas medias diarias (2011-2013).....	57
Figura 13. Grilla de cálculo (Izquierda) y batimetría (Derecha).....	58
Figura 14. Rugosidad ajustada a la malla de cálculo en Laguna Lo Galindo.....	59
Figura 15. Gráfico de caudal de entrada en sus diferentes áreas de drenaje.....	60
Figura 16. Gráfico de caudal de salida vs tirante hidráulico, del canal de salida.....	60
Figura 17. Simulación para calibración de Nivel del Agua.....	62
Figura 18. Simulación para calibración de temperatura del agua.....	62
Figura 19. Simulación para validación del Nivel del agua.....	64
Figura 20. Simulación para validación de temperatura del agua.....	65

Figura 21. Simulación de Temperatura del agua 2013.	67
Figura 22. Simulación de concentración de NO ₃	67
Figura 23. Simulación de concentración de PO ₄	68
Figura 24. Simulación de concentración de Clorofila- α	69
Figura 25. Promedio de simulaciones de velocidad media y sus vectores.	71
Figura 26. Desviación estandar de Temperatura del Agua.	72
Figura 27. Promedio de simulaciones de Clorofila-a y sus vectores de velocidad correspondiente.	73
Figura 28. Área de drenaje y fuentes aportantes en la entrada y salida del lago.	89
Figura 29. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Precipitación.	91
Figura 30. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs T° Ambiental.	91
Figura 31. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Radiación.	92
Figura 32. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs % de Humedad.	92
Figura 33. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Vel. de Viento.	93
Figura 34. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Vel. de flujo.	93
Figura 35. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs T° del agua.	94
Figura 36. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Fosfato.	94
Figura 37. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Nitrato.	95

Agradecimientos.

Gracias, absolutamente a todos. Creo que este proceso culminó con una serie de cambios, decisiones, emociones y nuevos sentimientos. Agradezco también a todas las personas que me han dado su apoyo, cariño y comprensión, en especial a mis amigos de siempre (Juan Ignacio Ibañez, Javier Ibañez, Bernardo Geldres, Aaron Geldres y Romina Rodriguez).

Agradezco el apoyo de mi familia, de mi papá (Roberto Balvoa) que ya no está físicamente, pero que junto con mi madre (Rosa Luengo) y hermana (María Paz Balvoa) han sido el pilar fundamental en todo este proceso.

A mis profesores y líderes durante mi formación académica que me permitieron avanzar en mis proyectos personales y formación profesional. (Roberto Urrutia, Gerardo Azocar, Carolina Baeza, Ricardo Figueroa, Mauricio Aguayo, Patricia Gonzales, Pedro Arriagada, Alberto Araneda, Diego Caamaño y Ricardo Barra).

Finalmente, a Sandra Cordova que me motivó a cerrar este proceso de una vez por todas, gracias por su cariño y amor incondicional.

Resumen

La necesidad del análisis de crecimiento de fitoplanctónico en los cuerpos lénticos se hace presurosa al aparecer eventos de floraciones algales, muy dañinas para los ecosistemas e incluso para la salud humana. Esta investigación proporciona un análisis de variables físicas y químicas sobre el desarrollo de bloom o floraciones algales, desde el enfoque numérico y en específico de la modelación ambiental (modelación hidrodinámica, de calidad de agua y ecológica) en la Laguna urbana Lo Galindo, caracterizada por tener altos niveles de concentración de nutrientes en la columna de agua, ubicada en la comuna de Concepción, Chile. Los resultados proporcionan que las dinámicas de floración algal sobre los coeficientes de correlación lineal presentan proporcionalidad directa en las variables de temperatura del agua (0,88), temperatura ambiental (0,53) y por otro lado coeficientes indirectamente proporcionales en la velocidades de flujo de la laguna (-0,63) y las velocidades del viento (-0,58). Estas variables en conjunto son capaces de explicar este fenómeno de bloom o floración algal en una laguna urbana Lo Galindo.

1. INTRODUCCIÓN

La floración algal o Bloom es definido como el crecimiento excesivo de colonias fitoplanctónicas en un cuerpo de agua, las cuales generan cambios en el equilibrio natural del ecosistema acuático. Entre los factores que gatillan el desarrollo de las floraciones se encuentran factores físicos, biológicos y químicos, lo cual dificulta su análisis y predicción (Scasso et al., 2001).

Entre los cuerpos de agua más vulnerables a la formación de floraciones algales se encuentran los lagos, lagunas y embalses (sistemas lénticos), ya que la morfometría de estos cuerpos de agua son muy vulnerables a efectos de estratificación y mayor estabilidad en la columna de agua, favoreciendo altas tasas de crecimiento en especies formadoras de Bloom (Reynolds, 1973). Además, los aportes hídricos que reciben los sistemas lenticos son principalmente externos, a través de su área de drenaje (terrestre) y desde la atmosfera (aportes pluviales). De tal modo que cualquier intervención en sus cauces podría significar una alteración en el equilibrio del ecosistema y su calidad del agua (Parra, 1989; Lewis et al., 2011).

Estas últimas características calzan muy bien con las lagunas de la ciudad de Concepción, la cual alberga lagos someros dentro de su espacio urbano, entre ellas; laguna Price, Pineda, Redonda, Las Tres Pascuales, Lo Méndez, Lo Galindo y Lo Custodio. La fuerte interacción con la población y la metrópolis, denominan a

estos cuerpos de agua como lagunas urbanas o lagos someros. Esto ha generado presiones externas para los cuerpos de agua, vinculadas a la actividad antrópica y expansión (eutrofización cultural), que han deteriorado la calidad del agua en las lagunas mencionadas (Parra, 1989; Almanza, 2016).

Estas lagunas, en su mayoría se originaron por la formación de meandros y paleocanales abandonados del río Biobío, los que por acción del viento fueron empujados hasta ser bloqueados por dunas (Parra, 2009), por ende, en su mayoría son lagunas pequeñas y de poca profundidad. Esta característica, sumado un alto nivel de nutrientes, factores climáticos y biológicos han dado oportunidad a la presencia de episodios de bloom algal.

Es el caso del lago Lo Galindo ubicado al noroeste de la ciudad, la cual fue monitoreada a partir del año 2011 hasta el año 2014, en el contexto de medir la calidad de sus aguas para el consumo humano. Debido al uso otorgado de la población como suministro de agua a las lagunas urbanas de Concepción, posterior al terremoto del 2010. El estudio encontró en casi todas las estacionalidades floraciones algales, tanto en la forma de espuma superficial o dispersiva (Almanza, 2016), detalle en la Tabla 1. Reconociendo al grupo de las cianofíceas, principalmente las *Microcystis aureginosa* Kützing, como la principal responsable de estos eventos de floración, a su vez son acompañadas por la presencia de sustancias tóxicas, cianotoxinas, (Tabla 2) generando ciertos riesgos para la salud humana y otras especies animales (FONIS, 2015; Almanza, 2016).

Tabla 1. Registro de aparición de floraciones algales en Laguna Lo Galindo.

Floración Algal	Periodos Estacionales				
	Verano 2012/13	Otoño 2013	Invierno 2013	Primavera 2013	Verano 2013/14
Aparición	Sí	Sí	Sí	Sí*	Sí
Tipo de Floración	Espuma	Dispersiva	Dispersiva	Dispersiva	Dispersiva

*Desde 30 de Septiembre al 30 de Octubre no existe presencia de Floración Algal.

Fuente: Almanza (2016)

Tabla 2. Floraciones algales de cianofíceas y cianotoxinas en Laguna Lo Galindo.

Nombre de laguna	Genero/Especie	Cianotoxinas
Lo Galindo	<i>Microcystis aeruginosa</i>	MC-RR, MC-FR, MC-LR, MC-YR

(Microcistina = MC, [RR, FR, LR, YR] = Diferentes tipos de microcistinas)

Fuente: FONIS (2015)

En este contexto, las condiciones en las cual se encuentra el estado ecológico de la laguna Lo Galindo es principalmente híper-eutrófico (Tabla 3), producto de las presiones urbanas y la escasa planificación territorial que existe alrededor de los lagos someros, incluyendo la poca gestión que existe para su mantención (Parra, 1989).

Tabla 3. Estado trófico de laguna Lo Galindo a través del índice de Carlson (1977).

Nombre de laguna	Estado Año 2011	Estado Año 2012	Estado Año 2013
Lo Galindo	76,15 (HI)	77,49 (HI)	54,28 (EU)

(Eutrófico EU = 50-60, Híper eutrófico HI= >60)

Fuente: Almanza (2016)

En suma, se tiene una alta disponibilidad de nutrientes y transporte de residuos constante en el lago somero, sumado a las relaciones complejas con los factores ambientales, se hace difícil evaluar el desarrollo de las floraciones algales, ya que diferentes condiciones, generan diferentes respuestas en el ecosistema y el crecimiento de *Microcystis*, lo cual crea un problema a la hora de garantizar un aprovechamiento óptimo del recurso hídrico para consumo o recreativo y obliga a incorporar un análisis más exhaustivo al estudio sobre estos fenómenos. Para ello, una de las herramientas existentes es la modelación matemática, permitiendo comprender la compleja dinámica producida tanto a nivel físico e hidrodinámico, calidad de agua y relaciones biológicas del sistema.

En este sentido, para tomar decisiones de gestión y control sobre las floraciones algales de la laguna Lo Galindo, se incurrió a modelar su estructura y funcionamiento, vale decir, su comportamiento hidrodinámico, las concentraciones de nutrientes y factores ambientales que influyan en el transporte o crecimiento del Bloom en el cuerpo de agua.

En el presente estudio se utilizó el software hidrodinámico, de calidad de agua DELFT3D que es capaz de acoplarse a un sistema de modelación ecológica, con el que se realizaron modelaciones numéricas, para comprender los patrones de mezcla existentes en Laguna Lo Galindo y las implicancias que pudiese tener en el crecimiento y el desarrollo tanto espacial y temporal de floraciones algales de *Microcystis*. Guiados por la pregunta ¿Cuál(es) forzantes fueron determinantes para el desarrollo de floraciones algales de *Microcystis* en la Laguna Lo Galindo?

2. HIPÓTESIS

Si las altas concentraciones de nutrientes en Laguna Lo Galindo no son limitantes para el desarrollo de floraciones algales, entonces estos eventos están determinados por la temperatura del agua.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General.

Evaluar a través de la modelación numérica, los escenarios dinámicos de las variables físicas y químicas que explican la distribución y desarrollo de floraciones algales de *Microcystis* en la Laguna Lo Galindo.

3.2 Objetivos Específicos.

1-Caracterizar limnológicamente la Laguna Lo Galindo en el periodo de estudio.

2-Caracterizar los patrones de mezcla en la Laguna Lo Galindo, mediante el modelo Delft3D.

3-Determinar cuál(es) son las variables que explican la distribución y desarrollo de floraciones algales en la Laguna Lo Galindo, a través del modelo Delft3D.

4. ANTECEDENTES

4.1. Floraciones Algales.

El fitoplancton y las microalgas suspendidas en la columna de agua son las principales responsables de la productividad de los ecosistemas acuáticos, estas utilizan luz, dióxido de carbono (CO_2) y nutrientes (P y N) para producir biomasa. La disponibilidad de nutrientes genera un sustento para la producción primaria, una vez que excede el nivel de consumo esta se acumula principalmente en el epilimnion, parte más superficial de un ambiente léntico, potenciando la aparición de los eventos llamados Bloom algal o floraciones algales.

Es posible encontrar colonias superficiales en concentraciones de células desde $1 \cdot 10^6$ y superiores [cel/mL], a tales concentraciones son llamadas floraciones de espumas o scums, debido a la cobertura espesa y densa que presentan. Mientras que otras colonias se dispersan por toda la columna de agua formando manchas de tonalidades desde verde a rojo, con concentraciones desde $2 \cdot 10^4$ a $1 \cdot 10^6$ [cel/mL], denominadas floraciones dispersivas (Bonilla et al., 2015).

En ambientes lénticos las floraciones de fitoplancton se generan principalmente por los grupos Cyanobacteria, Dinophyceae, Cholophyceae, Cryptophyceae, Chrysophyceae, Euglenophyceae y Bacillariophyceae (Paerl, 1988). De todos estos grupos formadores, aquellos que tiene mayor atención son los grupos que

poseen la capacidad de producir metabolitos secundarios tóxicos, debido a que para otros organismos, incluyendo al ser humano, resultan ser nocivos, entre esos grupos se destacan las Cyanobacteria, por lo anterior, han sido denominadas como floraciones algales nocivas (FAN), Harmful Algal Bloom (HAB) o también llamadas Cyanobacteria harmful algal Bloom (CyanoHabs) (Backer, 2002).

4.1.1. Efectos de Floraciones algales.

Los efectos del bloom algal son perjudiciales para los sistemas ecológicos en especial, por la generación de agentes patógenos y períodos de anoxia por el sobreconsumo de oxígeno disuelto en el agua. En la Figura 1 se presenta diagrama simplificado de las causas que producen las floraciones algales y en Tabla 4 se describen los efectos sobre los ecosistemas acuáticos.

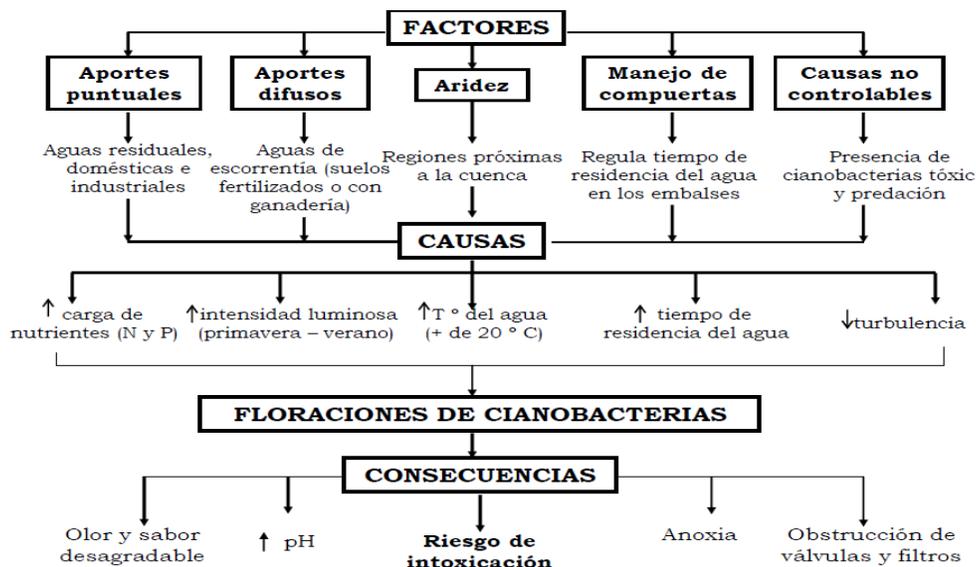


Figura 1. Diagrama de los factores, causas y efectos de las floraciones algales

Fuente: Pérez et al. (2008)

Tabla 4. Efectos de la Floración Algal sobre los sistemas acuáticos.

Efectos	Descripción	Referencia
Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> •La presencia de toxinas, genera posibles intoxicaciones y pueden llegar a ser mortales. •Cambio en los usos del agua, limitaciones para recreación y el consumo. 	De León (2002); Pérez et al. (2008)
Impacto sobre el ecosistema	<ul style="list-style-type: none"> •La degradación excesiva de materia orgánica sobre el cuerpo de agua, por parte de las bacterias. •Anoxia en el hipolimnion. •Sobrepoblación de colonias de fitoplancton. •Pérdida de biodiversidad o cambio en la estructura natural. •Impedimento del ingreso normal de radiación solar, necesaria para otros organismos acuáticos. 	Korhonen et al. (2012); Pérez et al. (2008); De León (2002)
Mal olor y sabor del agua	<ul style="list-style-type: none"> •Olor y sabor desagradable en el agua y espuma (scums), por la síntesis de Geosmina, 2-methyl-isoborneol, sintetizados por las cianobacterias y hongos, o a la liberación de gas sulfhídrico SH₂(g) por anoxia. 	Juárez & Azcue (2008); De León (2002); Pérez et al. (2008)
Efectos mecánicos y Económicos	<ul style="list-style-type: none"> •El Aumento de la biomasa y alta presencia de colonias fitoplanctónicas disminuye el espacio natural de otras especies, como peces, zooplancton y zoobentos. •Deterioro sobre las maquinarias náuticas, filtros o hélices que se ven afectadas por el almacenamiento de estas floraciones •La limpieza de los lagos, lagunas, equipos náuticos y cierres momentáneos de zonas aptas para el baño, generan pérdidas económicas. 	De León (2002); Rosso & Giannuzzi (2011)
Anoxia	<ul style="list-style-type: none"> •Disminución del oxígeno disuelto resulta fatal para especies mayores dependientes de los procesos de respiración, generando muerte en la biodiversidad. •Mayor disposición de Fe y P, en la columna de agua además. •Aumento de materia orgánica en los sedimentos por especies muertas. •Cambio en los regímenes metabólicos, estados de anoxia favorecen a organismos anaeróbicos. 	De León (2002); Brown & Carpenter (2013); De León (2002)

4.1.2. Causas de las floraciones algales.

Las floraciones algales son un proceso que ocurre en ambientes acuíferos eutrofizados (Hallegraeff, 1992), por lo tanto, algunos mecanismos de eutrofización coinciden en el efecto de las floraciones algales. Es decir, que un evento de floración casi siempre estará ligado a la eutrofización, teniendo como característica la disponibilidad excesiva de nutrientes en la columna de agua. A pesar de esto, en ciertas condiciones se puede desarrollar blooms en ambientes oligotróficos o también bajo condiciones no ideales (Parra, 1989; Scasso et al., 2001).

En los procesos de floración algal, según los enfoques empíricos se distinguen diferentes situaciones potenciadoras para que ocurra este fenómeno, encontrando mecanismos físicos, donde se incluyen propiedades forzantes de mezcla en el cuerpo de agua, limnología, temperatura, entre otros, éstas son vistas con mayor detalle en la Tabla 5.

Tabla 5. Factores que influyen en la generación de floraciones algales.

Factores Físicos	Descripción	Referencia
Presencia de organismos Formadoras	La existencia de cianobacterias o grupos formadores de Bloom en los cuerpos de agua, son una de las más importantes características de formación, ya que diferentes grupos posee diferentes estrategias de crecimiento y competencia entre sus pares tanto para clorofíceas o cianobacterias y entre otras.	Pérez et al. (2008)
Origen	Los lagos y lagunas de origen fluvial, tienden a ser menos	Vila (2003)

Limnológico y Profundidad	profundos, estos se ven más afectados por la dinámica de mezcla, consiguiendo productividades altas en menores tiempos. Los que favorecen la estabilidad de la columna de agua y la proliferación de microalgas con mayor facilidad.	
Tiempo de Residencia del flujo agua	Los altos tiempos de residencia favorecen los eventos de floraciones algales, ya que la renovación de agua es más lenta, esto da estabilidad a la columna de agua y mayor tiempo a la permanencia de nutrientes.	Vila (2003); De León (2002)
Carga de Nutrientes y Estado Trófico	Debido a la alta disponibilidad de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, capaces de abastecer los grupos formadores de blooms. Cargas externas e internas de nutrientes aumentan la eutrofización.	De León (2002) Hallegraeff (1992); Parra (1989)
La aridez	Debido a que la vegetación tiene función de filtro natural. Suelos sin vegetación suelen aportar mayor cantidad de minerales al agua, al no poseer una barrera de protección.	Rosso & Giannuzzi (2011)
Turbidez	Se genera por el exceso de partículas disueltas. Esto interfiere con la actividad fotosintética de los organismos, que mueren y sedimentan, dejando un nicho que es colonizado por las cianobacterias.	Rosso & Giannuzzi (2011)
Temperatura	El incremento en temperatura afecta específicamente la estabilidad y actividad de enzimas, aumentando la velocidad de crecimiento quimiutrófico. Los efectos de anoxia en el hipolimnion generalmente traen consigo un aumento en la temperatura, favoreciendo la solubilidad de los sedimentos, entre ellos Fosforo. El nivel óptimo de T° para la formación de blooms está entre los 0-20 [°C] para la <i>Microcystis aureginosa</i> .	Imai et al. (2008); Hammer (1964)
Intensidad luminosa (Radiación)	Depende del ángulo de incidencia, estación del año y turbidez del agua. Los espectros de la luz que atraviesan la columna de agua y regulan la actividad fotosintética, la capacidad de absorber la radiación de los microorganismos depende de la naturaleza de los pigmentos receptores que poseen, por consiguiente difieren en su habilidad para absorber diferentes longitudes de onda. Las	Roldán & Ramírez (2008); Madigan et al. (1997); Havens et

	cianobacterias, poseen pigmentos receptores como; ficocianinas, cuyo máximo es a 620 [nm] y ficoeritrina, máximo de 565 [nm]. Cuando las radiaciones comienzan a aumentar en periodos de verano y primavera mejoran las condiciones del desarrollo de Bloom algal. In vitro, se ha demostrado que la capacidad de absorción y producción de la <i>Microcystis</i> mejora en los 33 [W/m ²] efectiva, debido a que mejora entre un 60% para captación de fósforo y 39% para el aumento en la producción de C.	al. (2003)
Efecto del Viento y Precipitación	Los cambios en la magnitud y dirección del viento generan variaciones en la capa de mezcla de la columna de agua, este provoca desplazamientos horizontales y verticales de las masas en la capa superficial, generando la redistribución de las variables tanto físicas como biogeoquímicas. La ausencia de viento, menor a 3 [m/s], acelera los procesos de sedimentación, el agotamiento de los nutrientes y la acumulación superficial de cianobacterias.	Ramos & Redondo (2007); De León (2002).
pH	Un pH elevado genera disolución de Fósforo (Ortofosfato) desde los sedimentos lo que genera un incremento en la producción fotosintética, esto favorece a la floración algal que principalmente consume fosforo inorgánico.	Korhonen et al. (2012); Pérez et al. (2008)

4.2. Floraciones algales de Cianobacterias.

Las cianobacterias son organismos pertenecientes al fitoplancton, estas tienen características en común con las bacterias, las cuales carecen de un núcleo verdadero y con los organismos eucariotas, al habitar en los mismos nichos ecológicos y realizar la fotosíntesis oxigénica además, poseen mecanismos de defensa que evitan su depredación por parte del zooplancton, por ejemplo, la formación filamentosa en la estructura de *Dolichospermum* (Almanza, 2016), algunos de los principales géneros desarrolladores de Bloom son nombradas en la tabla 6.

Tabla 6. Principales Géneros de Cianobacterias formadoras de floraciones algales.

Géneros	Géneros	Géneros	Géneros
<i>Anabaena</i>	<i>Cylindrospermopsis</i>	<i>Nodularia</i>	<i>Pseudanabaena</i>
<i>Anabaenopsis</i>	<i>Dolichospermum</i>	<i>Nostoc</i>	<i>Synechocystis</i>
<i>Aphanizomenon</i>	<i>Gomphosphaeria</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Synechococcus</i>
<i>Aphanocapsa</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Phormidium</i>	<i>Planktothrix</i>

Fuente: De León (2002)

Las cianobacterias tienen ventajas frente a los demás grupos desarrolladores de fotosíntesis, puesto que tienen vacuolas de gases en su estructura, esto les permite moverse a través de la columna de agua, para encontrar las condiciones óptimas de luz y/o nutrientes en su proceso fotosintético. También, poseen mecanismos alternativos de fijación de nutrientes en caso de bajas concentraciones de nutrientes (Horne & Goldman, 1994). Debido a estas características de competencia son consideradas como uno de los principales grupos responsables de la formación de floraciones algales.

4.2.1. Mecanismos físicos de formación de bloom.

Las colonias de cianobacterias, pasan por un proceso de crecimiento antes de considerarse un bloom o una floración algal, este proceso se observa en la figura 2, la cual consiste en 6 etapas. La primera etapa muestra al género de cianobacteria libre en la columna de agua. Posteriormente, la etapa dos recibe el aporte de nutrientes, un aumento de la temperatura y mayor disponibilidad de luz,

lo que permite en la etapa tres la formación de pequeñas colonias y filamentos, gracias a las vacuola de gases que poseen en su estructura, las cianobacterias son capaces de movilizarse y buscar mejores condiciones para su crecimiento. En la etapa cuatro, comienza la generación de bloom, bajo condiciones de estabilidad en el momentum de la columna de agua y además bajas condiciones de luz, esto conduce a que las algas a la superficie que intentan buscar la luz. La etapa cinco muestra la dinámica de la retroalimentación del bloom, que es la producción de CH_2O , a medida que las colonias van creciendo también mueren, perdiendo flotabilidad. La última etapa está sub-divida en 3 etapas A, B y C. En A, se forma un bloom superficial o de espuma, debido a condiciones de baja luminosidad y estabilidad en la columna, en B la floración se acumula en las orillas, principalmente por la influencia del viento y el tiempo de residencia altos y C, es el bloom dispersivo, a causa de altas magnitudes en los vientos (mayores a 3 [m/s]) las colonias no logran mantenerse en la superficie y se estabilizan en el interior de la columna de agua (Burger et al., 2008)

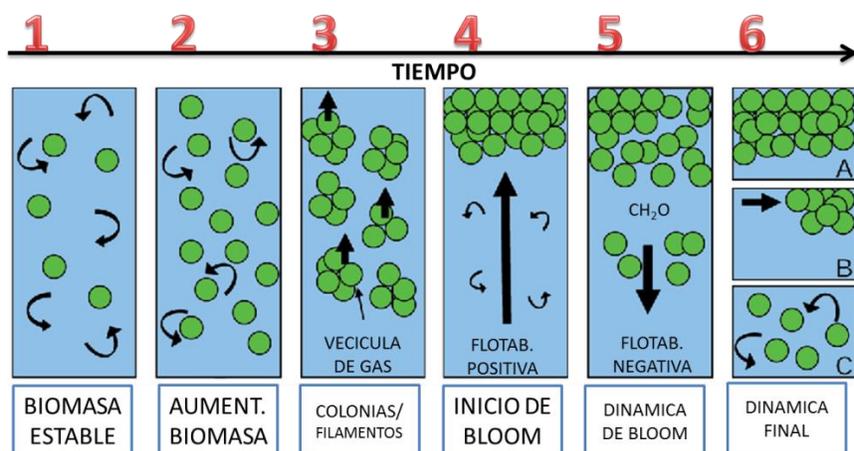


Figura 2. Dinámica de formación de bloom en cianobacterias.

Fuente: Modificado de Burger et al. (2008)

4.2.2. Mecanismos de obtención de nutrientes.

La disponibilidad de nutrientes, radiación, factores de mezcla, temperatura, entre otros han sido descritos como factores condicionantes para el desarrollo de floraciones de cianobacterias (Parra, 1989; Huisman et al., 1999; Chen et al., 2003). En ocasiones, el aporte de nutrientes limitantes (N y P) y otros nutrientes trazas (Si, Fe, Mn, Mo, Cu, Co, Zn), pueden encontrarse no disponibles o en concentraciones bajas, debido a esto, las cianobacterias desarrollan mecanismos alternativos para la obtención de sus nutrientes (Vintila & El-Shehawy 2007; Horne & Goldman, 1994). Algunos de estos mecanismos son explicados en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7. Mecanismos de obtención de nutrientes y otras moléculas en Cianobacterias.

Nutriente	Obtención	Referencia
C y O	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ y O₂: El mecanismo más común para cianobacterias, estos ingresan al metabolismo mediante la enzima ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa, que fija CO₂ y al mismo tiempo actúa como enzima oxigenasa. • HCO₃⁻: Un mecanismo alternativo para el ingreso de Carbono, a través de la enzima Anhidrasa carbónica. 	Madigan et al. (1997)
N	<ul style="list-style-type: none"> • N₂ atmosférico: <i>Anabaena sp.</i> y <i>Nodularia spumigena</i> absorbe a través de un mecanismo secundario de fijación. Mediante la enzima nitrogenasa es capaz de abastecerse de N, en bajas concentraciones de NO₃⁻ y NH₄⁺. • NH₄⁺: <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> y <i>Nodularia spumigena</i> poseen afinidad a Amonio en altas concentraciones, a través de la glutamina sintetasa-glutamato sintetasa. • NO₂⁻ y NO₃⁻: <i>Anacystis nidulans</i> y <i>Microcystis aeruginosa</i> son capaces de fijar nitrito y nitrato a través de Nitrato reductasa y Nitrito reductasa. 	Vintila & El-Shehawy (2007); Loreto et al. (2003); Fabre et al. (2010)
P y Fe	<ul style="list-style-type: none"> • PO₄⁻: Ingresa por medio de osmosis que luego se almacena como polifosfato, importante para la formación de ATP y otros fosfatos en los metabolismos. • Fe⁺³ y Fe⁺²: El aporte de Hierro III y II proviene de la oxidoreducción de los sedimentos, La fijación principalmente se debe a Feproteína represora Fur (ferric uptake regulator). Fierro es útil para la formación de metaloproteínas y procesos ADN-dependientes. 	Gómez et al., (2006); Escolar et al. (1999)

4.2.3. Floraciones de *Microcystis*.

Las floraciones de *Microcystis* se caracterizan por formar colonias espesas con densidades celulares desde $1.5 - 2 \cdot 10^4$ [cel/mL] (Rosso & Giannuzzi, 2011), pero ciertamente cada valor sugiere la revisión del cuerpo de agua de origen. Además, otra singularidad está dada por su tono verdoso. En la figura 3, se aprecia en una fotografía colonias de *Microcystis* y el tipo de floración que produce este género.



Figura 3. Morfología de *Microcystis* y bloom de *Microcystis*.
(Izq.) La fotografía muestra colonias de *Microcystis* desde un microscopio, (Der.) Se observa la presencia verdosa de bloom de *Microcystis* en el lago Lo Galindo de Concepción.

Fuente: Obtenido desde Medrano et al. (2013); Almanza (2017).

Su factor limitante de crecimiento, está en base a la absorción de N, P y la radiación disponible. La absorción de nitrógeno ingresa a su sistema a través de NO_3^- y NO_2^- , a diferencia de otras especies *Microcystis* no absorbe N_2 atmosférico ni NH_4^+ , por otro lado fósforo (P) ingresa al sistema de las *Microcystis* como Ortofosfato, PO_4^{2-} (Gerloff et al., 1954). Las tasas de absorción de nutrientes mejora en condiciones de mayor temperatura del agua, debido a que los aumentos de temperatura maximizan el metabolismo microbiano (Paerl, 1988). Con respecto a la eficiencia fotosintética de *Microcystis*, bajo condiciones ideales de nutrientes, se establece en rangos de 8 a 30 [W/m^2] de radiación solar y a pH 7,2-8,0 (Los, 1982; Li et al., 2012).

El género de *Microcystis* tiene ciertas ventajas frente a otros géneros desarrolladores de bloom, este posee un mecanismo de defensa que forma un recubrimiento de mucilago en las colonias, para protegerse de los depredadores y la síntesis de toxinas, a través de mecanismos secundarios, para el mismo fin (Almanza, 2016). El desarrollo de toxinas de *Microcystis*, ha sido el mayor foco de preocupación a nivel mundial debido a la gravedad de los afectados con estas toxinas. En la tabla 8 se muestra algunos de los efectos en la salud humana de las cianotoxinas vinculadas a la cianobacteria *Microcystis*.

Tabla 8. Caracterización de cianotoxinas y efectos en humanos.

Cianotoxinas Alcaloides provenientes de <i>Microcystis</i>		
Toxinas	LD ₅₀ (Dosis en Ratones)	Efecto en humanos
<u>Irritantes</u> Lipopoli- sacarido	---	Lesiones en la piel, irritaciones alérgicas.
Cianotoxinas Péptidas Cíclicas provenientes de <i>Microcystis</i>		
<u>Hepatotoxina</u> Microcystina	45->1000 µg/kg	Respiración jadeante, diarrea, vómitos, dolor de cabeza, gastroenteritis o insuficiencia hepática. Daños acumulativos en hígado.

Fuente: Backer, (2002); De León, (2002)

Como ya se ha visto anteriormente, la capacidad de formación de bloom en todos los géneros no solo depende de la disponibilidad de nutrientes y de las especies formadoras, también de las condiciones físicas y limnológicas que existan en el cuerpo de agua, para que impulsen la distribución y transporte de las sustancias en el interior, por lo que se hace necesario una comprensión de todas las variables del sistema de equilibrio dinámico, en este sentido las herramientas matemáticas reconstructoras de escenarios, pueden entregar soluciones prácticas a estos problemas y al control y toma de decisiones, para su mitigación o entendimiento.

5. METODOLOGÍA

5.1. Área de estudio.

El área de estudio está emplazada en el casco urbano de Concepción, región del Biobío específicamente en el sector noroeste de la ciudad, a las faldas del cerro Lo Galindo ($36^{\circ}48'01''$ S, $73^{\circ}02'31''$ W). Corresponde al sector Teniente Merino – Chacabuco. Este sector tiene una superficie de aproximadamente 342 [ha] aproximadamente (EULA, 2012). En el lugar se ubica el lago urbano Lo Galindo (Figura 5), cuerpo de agua estudiado en esta investigación.

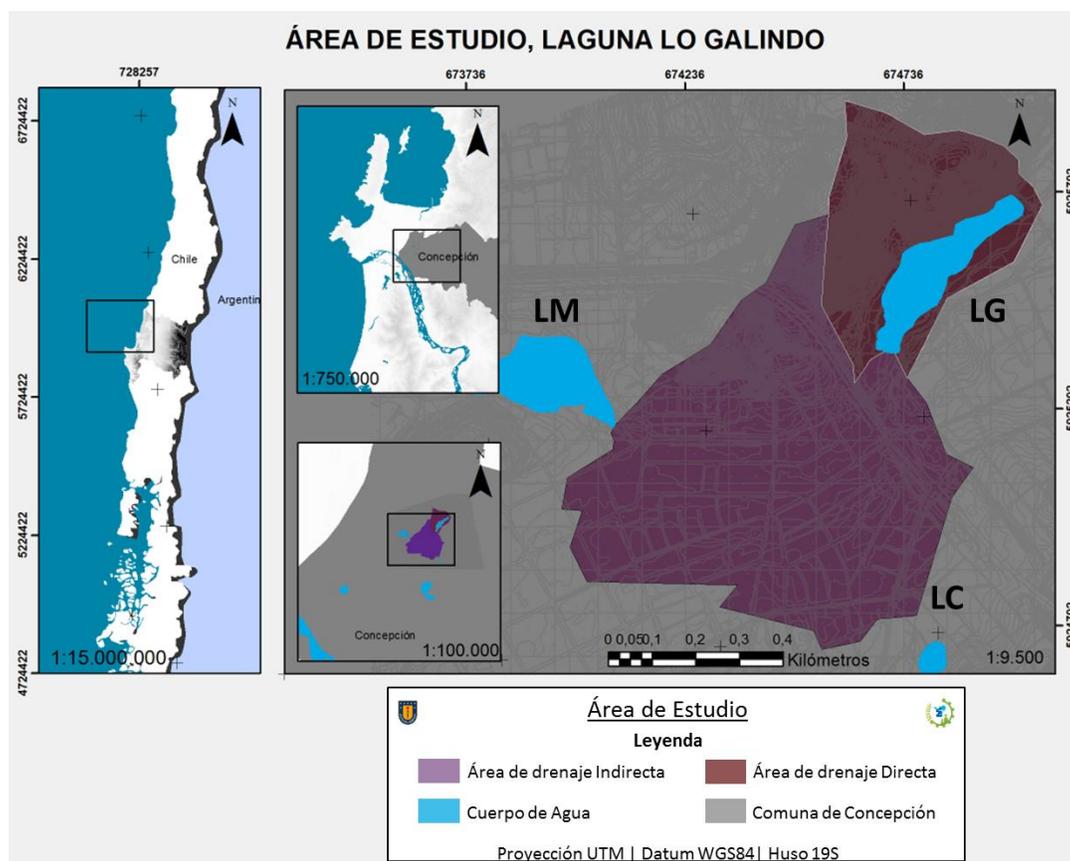


Figura 4. Área de estudio y lago Lo Galindo.

Fuente: Elaboración Propia.

Las áreas de drenaje son consideradas como espacios físicos en donde escurre el agua aportando caudal al sistema, estas áreas combinadas con los datos de precipitación permiten determinar los volúmenes de agua precipitados y potencialmente disponibles para la laguna. Las áreas están graficadas en la Tabla 10, donde se puede reconocer área superficial, Área de drenaje directo y Área de drenaje indirecto, el mapa original puede observarse en Anexo 1.

Tabla 9. Áreas de drenaje de Laguna Lo Galindo.

Nombre Laguna	Área Superficial o Espejo de agua (1000 [m ²])	Área de Drenaje Directo (1000 [m ²])	Área de Drenaje Indirecto (1000 [m ²])
Lo Galindo	49,45	183,32	1551,02

Fuente: EULA (2012).

El área superficial o espejo de agua de la Laguna Lo Galindo, posee una forma alargada y este tiene características de lago somero con una profundidad máxima de 2,9 [m] y volumen de 113.650 [m³] (EULA, 2012), las características morfométricas pueden observarse en la Tabla 11.

Tabla 10. Características morfométricas de laguna Lo Galindo.

Nombre de laguna	Origen	Ancho [m]	Largo [m]	Perímetro [m]	Área [1000 m ²]	Volumen [1000 m ³]	Profundidad Máx [m]
Lo Galindo	Fluvial-Eólico	129,4	519,07	1142,69	49,45	113,65	2,9

Fuente: EULA (2012).

Con respecto al sector aledaño o su cuenca directa, está destinado principalmente al uso áreas verdes y residenciales (Tabla 12). Se distinguen 2 tipos de áreas

verdes, la mayor parte de estas se concentran en el cerro Lo Galindo, que colinda directamente con la laguna. Por otro lado, el sector habitacional está compuesto por calles, viviendas y estacionamientos, esta proximidad habitacional y una indebida gestión de residuos, genera la acumulación de escombros y basura, los cuales afectan la calidad de agua (EULA, 2012).

Tabla 11. Usos de suelo de la cuenca directa aportante a la laguna Lo Galindo.

Uso de Suelo	Porcentaje de cuenca
Área Verde con mantención	19%
Área verde sin mantención	71%
Urbanizado (viviendas, calles...)	10%

Fuente: EULA (2012)

Finalmente el área de drenaje indirecto se concentra mayormente como un sector residencial, posee redes de canales de aguas lluvias, destinados a distribuir las precipitaciones de este sector hacia la Laguna Lo Galindo y consiguientemente desembocarlas en el río Andalién. Por ende, las lagunas urbanas de Concepción, Laguna Lo Mendez, Lo Custodio están conectadas a través de este sistema de aguas lluvias que desemboca antes en Laguna Lo Galindo.

Por otro lado, el clima de la ciudad de Concepción es templado marítimo de costa oeste, con influencia mediterránea. En promedio posee una temperatura de 17 [°C] en verano y de 8 [°C] durante el invierno. El régimen térmico es suavizado por la acción moderadora que ejerce su cercanía al océano pacífico, manifestándose

en leves amplitudes diarias y anuales. El promedio anual de precipitaciones de Concepción es de 1100 [mm], entre los meses de Mayo y Agosto se acumula de un 65% a 70% del total anual de las lluvias. Durante los meses de Octubre a Abril predominan las altas presiones del anticiclón del Pacífico sur, que se ubica frente a las costas de la zona central de Chile, lo que genera una alta frecuencia de viento desde el sector sur a suroeste. En cambio durante el período de lluvias, se tiene una alta frecuencia de viento desde el norte, producido por los ciclones que acompañan a los sistemas frontales de mal tiempo (Mardones y Vidal, 2001).

5.2. Recopilación Bibliográfica disponible.

Esta sección está destinada a describir la fuente de información que se utilizó en esta investigación, para la correcta caracterización de laguna Lo Galindo.

5.2.1. Meteorología, batimetría y niveles del agua.

Tanto la batimetría del lago urbano Laguna Lo Galindo, la Meteorología y los niveles del agua pertenecen al estudio desarrollado por el proyecto INNOVA “Agua, situaciones de emergencia, factibilidad técnica para el abastecimiento de agua potable desde un sistema de lagunas urbanas” (Proyecto 10CREC-8453) del Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile de la Universidad de Concepción en el año 2012. El cual poseía la información de 65 puntos batimétricos además, los

niveles del agua y temperatura del agua en el mismo lago poseen series de tiempo de cada 10 minutos por 1 año correspondiente al año 2011 (EULA, 2012).

5.2.2. Áreas de drenaje.

Con respecto a la escorrentía producida por las precipitaciones en el área de drenaje, los coeficientes y características importantes de la infraestructura de sus colectores de aguas lluvia, se obtuvieron a través del informe “Plan Maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Concepción, VIII región”, elaborado el año 2001 por el Ministerio de obras públicas (MOP, 2001).

5.2.3. Calidad de Agua.

Los datos de históricos de concentración de nutrientes como (PO_4 , NH_4 , NO_3 , NO_2 , TP y TN) y calidad de agua de la laguna Lo Galindo con resolución de muestreos de cada 15 días durante 2 años, se obtuvo a través del trabajo realizado por la doctora Viviana Almanza “Floraciones de fitoplancton en ambientes eutróficos: Dinámica y factores condicionantes en los lagos someros de Concepción, Chile Central”, presentados en su tesis doctoral del año 2016 en la Universidad de Concepción, Chile.

5.3. Modelación Numérica.

Se denomina modelo a un conjunto de conceptos y/o ecuaciones que llevan a la aproximación de un fenómeno real, tanto en un análisis cuantitativo como cualitativo. Actualmente existen aplicaciones informáticas que permiten la creación de modelos con formulaciones, en general matemáticas o estadísticas, para cada caso específico. A causa de esto, se trata de una poderosa herramienta que ayuda a solucionar grandes sistemas de ecuaciones y a la toma de decisiones frente a problemáticas del mundo real. Distinguiéndose modelos reconstructivos de escenarios de dos tipos para esta fenomenología ligada al bloom, modelos numéricos estadísticos de regresión lineal y modelos numéricos en base a la hidrodinámica de los fluidos.

5.3.1. Tipos de modelos utilizados en floraciones algales.

La gran mayoría de modelos numéricos de fluidos derivan sus ecuaciones del principio de continuidad y momentum, estos difieren entre sí en base a los supuestos elegidos para la resolución de estas ecuaciones. La ventajosa capacidad de estos modelos matemáticos, es su capacidad de reproducir la dinámica de transporte a través de múltiples operaciones matemáticas complejas, pero cabe señalar que estas herramientas están condicionadas al proceso de calibración del mismo, que tiene por objetivo asegurar la validez del modelo como herramienta predictiva.

A continuación se presenta en la tabla 9, las ventajas de los diferentes modelos para el estudio del desarrollo de floraciones algales.

Tabla 12. Caracterización de modelos utilizados en el estudio de Bloom.

Modelo	Dim	Ventajas	Desventajas	Ref.
Regresión Lineal	Múltiple variable	· Utilización de variables independientes	· Subestima interrelación · Sensible a variación atípica	Almanza (2016)
Modelo 1D	f(x,t) f(y,t) f(z,t)	· Es un modelo compacto · Interrelaciona variables, en las ecuaciones	· Subestima complejidad de sistema. · Omite dos ejes	Sourisseau et al. (2008)
Modelo 2D	f(x,y,t) f(x,z,t) f(y,z,t)	· Ofrece resultados robustos · Interrelaciona variables, en las ecuaciones	· Compleja utilización, de software · Omisión de 1 eje · Mayor necesidad de datos en terreno, para un correcto funcionamiento	Los (2009); Medrano et al. (2013)
Modelo 3D	f(x,y,z,t)	· Ofrece resultados robustos · Interrelaciona variables, en las ecuaciones	· Compleja utilización, de software · Mucha mayor necesidad de datos en terreno, para un correcto funcionamiento	Chen & Mynett (2006); Deus et al. (2013)

*dim= dimensión.

5.3.2. Modelo DELFT3D.

DELFT3D es un modelo de hidrodinámico realizado por el W | L Delft Hydraulics en Delft, Holanda, que incorpora el acople de sus resultados a diferentes módulos propios, entre estos están los módulos: Hidrodinámico (FLOW), Calidad de Agua (WAQ), Oleaje (WAVE), Ecológico (ECO) entre otros. Ha sido ampliamente utilizada en la modelación de sistemas lacustres, además, en criterios de calidad de agua ha sido utilizada también en el estudio de floraciones.

Una de las ventajas de este modelo sobre otros modelos de floraciones algales, está en el acople de sus módulos, los cuales a través de sucesiones de algoritmos en las ecuaciones de borde, dan como resultado la concentración de biomasa expresada en Clorofila-a [$\mu\text{g/L}$], esta puede ser expresada también como la proporción de biomasa correspondiente al crecimiento de cada grupo de fitoplancton formador, por ende, también el modelo es capaz de representar la competencia, además de otras interacciones con las comunidades fitoplanctónicas. Para ello, se describe un esquema del proceso en la Figura 4, sobre el modelo DELFT3D y la obtención de los resultados de fitoplancton formador de floraciones algales.

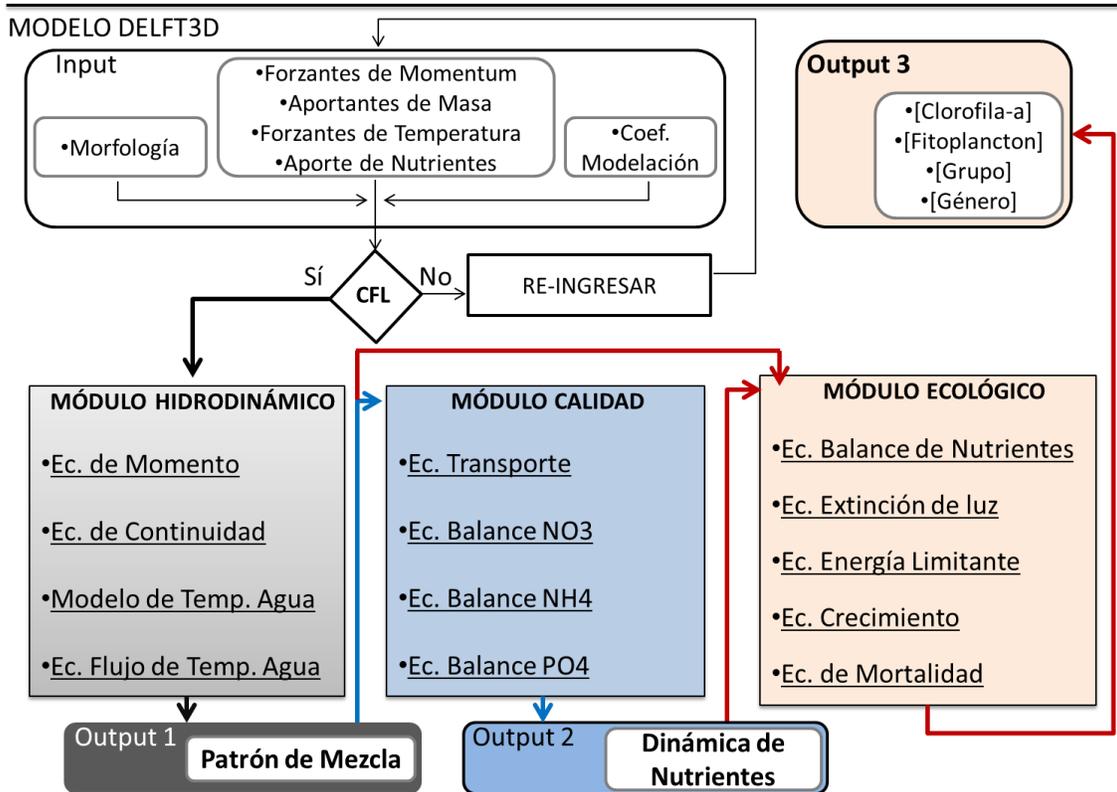


Figura 5. Diagrama de flujo para obtener concentración de fitoplancton en DELFT3D

Fuente: Elaboración Propia

El modelo comienza con el ingreso de los parámetros de entrada (input), entre ellos se identifica 3 grandes grupos, Morfológicos, Forzantes y Coeficientes de Modelación. El grupo Morfológico tiene por objetivo el ingreso de la grilla de cálculo, que representa la porción física que ocupa o podría ocupar el cuerpo de agua además, del ingreso de la respectiva profundidad del cuerpo de agua o batimetría por último, la rugosidad que posea el fondo el cuerpo de agua. Los forzantes son parámetros variables en el tiempo, que son capaces de responder a los fenómenos físicos forzantes de temperatura del agua, momentum horizontal en el cuerpo de agua, aportes de contaminantes o nutrientes y en general cualquier

aporte al sistema. Los coeficientes de modelación hacen relación a los coeficientes necesarios de la resolución numérica de las operaciones matemáticas (time-step, coeficiente alpha de reflexión) o con las propiedades del cuerpo del agua (densidad, vorticidad, etc...).

Una vez ingresado todo el input, debe pasar a una etapa de verificación numérica, para identificar la estabilidad de la solución matemática, esta es una etapa iterativa que debe ajustarse a las condiciones establecidas por el verificador llamado Número de Courant-Friedrich-Lewy (CFL), cuando el ajuste a este número sea correcto la solución numérica será estable, por lo tanto, podrá ingresar a las operaciones siguientes.

El primer módulo es llamado MOD_FLOW, en este módulo se obtiene el patrón de mezcla a través de la dinámica de los forzantes, ya sea de temperatura del agua, momentum y masa. El objetivo de este módulo es representar fielmente los tipos de corrientes y distribución de los elementos en el espacio. Este sistema resulta el más importante, pues independiente del contenido de las operaciones de calidad de agua o ecológicas, este sistema es capaz de distinguir la velocidad de las corrientes en el cuerpo de agua, tiempos de residencia, lo que lo hace distinguir notablemente un lago o laguna de un río y una bahía.

El segundo módulo es llamado MOD_WAQ, este módulo resuelve un balance de masa específico de sustancias que traspasan dinámicamente diferentes

compartimientos en el cuerpo del agua, por ejemplo: sedimentos, materia orgánica, materia inorgánica, fitoplancton, entre otros. Por lo tanto, está en una constante dinámica con el consumo de nutrientes y la transformación de estos nutrientes en diferentes formas moleculares ciclo de Nitrógeno y ciclo de Fósforo por ejemplo.

El último módulo es llamado MOD_ECO o anteriormente llamado GEM, involucra en el sistema todos los módulos pasados, este módulo debe ser programado anteriormente con la selección del fitoplancton existente, de esta forma debe calibrarse la abundancia del fitoplancton, el tipo de fitoplancton y la biomasa existente generada por el fitoplancton. Se trata de uno de los pocos modelos capaces de acoplarse dentro de sí mismo, para resolver las ecuaciones de crecimiento de fitoplancton. Además, debe distinguirse que la ventaja sobre otros modelos es que, posee librerías con ciertos géneros formadores de floraciones algales, géneros de diferentes grupos de fitoplancton son especificados los tipos de crecimientos de cada uno de ellos y preferencia de nutrientes, etc. Por ejemplo, para *Anabaena*, *Microcystis*, *Cillindrospermopsis*, entre otras.

En este tipo de modelo se puede observar la dependencia total que teóricamente se describe con un aspecto biológico, físico-ambiental y de disponibilidad de nutrientes en el sistema ecológico.

5.4. Procesos de modelación Hidrodinámica.

Para la modelación hidrodinámica, se utilizó el modelo DELFT3D versión 4.01.01.rc.03, MSWindows5.3, a través del módulo FLOW. Con su respectiva licencia de uso.

En la Figura 6, se muestra un esquema general de la combinación de procesos y el tratamiento de datos que se realizó para esta sección de la investigación. En el cual, se observa, que la primera etapa consta de la preparación del módulo FLOW, donde debe pasar las pruebas de calibración anterior a cualquier validación. Posteriormente se analizó la dinámica de los patrones de mezcla de la laguna en estudio.

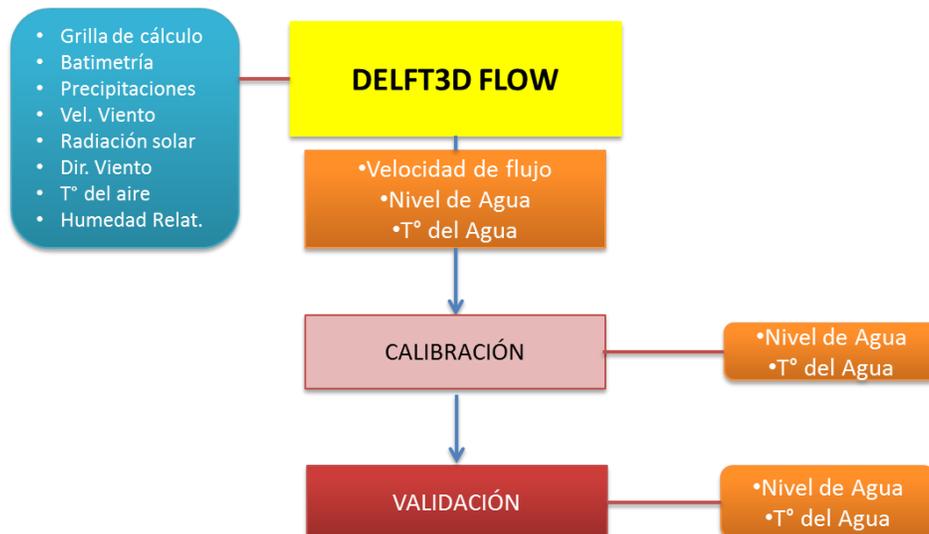


Figura 6. Esquema simplificado de las etapas de la modelación hidrodinámica.

Fuente: Elaboración Propia.

5.4.1. Ecuaciones Hidrodinámicas.

El software DELFT3D en su módulo hidrodinámico DELFT3D-FLOW, es capaz de resolver la ecuación Navier-Stokes según los siguientes criterios.

- El fluido debe ser incompresible, es decir, que mantiene constante su densidad a lo largo de todo el flujo.
- Incluye la aproximación de Boussinesq, (La escala de longitud horizontal es significativamente mayor que la escala vertical), esto desprecia el momentum vertical y las aceleraciones verticales, lo cual conlleva a la ecuación de presión hidrostática. En el caso de modelos 3D las velocidades verticales son calculadas a partir de la ecuación de continuidad.
- Las ecuaciones se resuelven utilizando un esquema de diferencias finitas por el método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*), en un sistema coordenado curvilíneo ortogonal de ejes (ξ, η) , la coordenada vertical del dominio se discretiza en un número igual de capas, donde las capas no tienen un espesor uniforme sino que varían de acuerdo a la profundidad.
- Las fluctuaciones de turbulencia se incluyen en el modelo mediante los esfuerzos de Reynolds, los cuales están definidos a través del modelo de cierre de turbulencia.

Ecuación de continuidad

La ecuación 1 representa la ecuación de continuidad promediada en el respectivo plano de ejes (ξ, η) , donde ζ es el nivel del agua por encima del plano horizontal de referencia (grilla o malla de cálculo), la profundidad por debajo del plano es representada por la letra d , $\sqrt{G\xi\xi}$ y $\sqrt{G\eta\eta}$ son los coeficientes utilizados para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares y U y V son las velocidades de profundidad promediadas en las direcciones ξ y η respectivamente.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \left((d + \zeta)U\sqrt{G\eta\eta} \right)}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \left((d + \zeta)V\sqrt{G\xi\xi} \right)}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad (1)$$

Ecuación de momento en las direcciones ξ y η

Las ecuaciones 2 y 3, representan la ecuación de conservación momentum en las diferentes direcciones ξ y η , donde P_ξ y P_η son los gradientes de presión respectivos, F_ξ y F_η representan los desequilibrios de los esfuerzos horizontales de Reynolds en las direcciones ξ y η (modelados bajo los conceptos de viscosidad de Eddy), M_ξ y M_η representan la contribución de fuerzas externas al momentum en los ejes correspondientes, ρ_0 es la representación de la densidad del agua, f_u y f_v son las componentes de la fuerza de Coriolis en u y v , σ es la coordenada vertical escalada según el sistema coordenado tipo σ .

En ξ

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{(d+\zeta)} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} - f_v \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G\xi\xi}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (1)$$

En η

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{(d+\zeta)} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} - f_u \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G\eta\eta}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (2)$$

Estabilidad numérica

El tamaño de la malla y el paso de tiempo de modelación (time step) surgen del análisis del número de Courant-Friedrichs-Lewy, ecuación 4, que se aplica en la solución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales para garantizar la estabilidad numérica, se recomienda en el manual no debe exceder al número 10. Donde Δt es el paso de tiempo utilizado, Δx y Δy son el tamaño medio de celda de malla, g responde a la constante de aceleración de gravedad y H a la profundidad total del agua.

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{(\Delta x, \Delta y)} \quad (3)$$

5.4.2 Configuración del modelo hidrodinámico.

Límites terrestres

El límite terrestre se obtuvo a través del plan maestro de aguas lluvias, se observó que parte de las aguas que alimentan la laguna Lo Galindo, se conectan con laguna lo Méndez y laguna Lo Custodio por canales de aguas lluvia. Además, se extrajo el área de drenaje con los respectivos coeficientes de esorrentía que posee la laguna, las especificaciones de la ubicación de entrada y salida del lago, especificaciones técnicas del tipo de acueductos y sus dimensiones.

Grilla horizontal de cálculo

Se creó una malla o grilla rectangular horizontal, a través del módulo de RGFGRID del modelo DELFT3D, en base a los puntos de la batimetría proporcionada, La malla posee un tamaño de 77 x 52, con 2966 celdas, se ingresó como formato “.*grd*”. El tamaño de la grilla corresponde al cálculo proporcionado por la ecuación de Courant-Friedrichs-Lewy, que representa la estabilidad ideal numérica en base al tiempo de modelación, tamaño de la celda y profundidad total del agua.

Batimetría

La batimetría se generó a través del módulo QUICKIN del modelo DELFT3D, por medio de 65 puntos en el formato “.*xyz*” se interpoló triangularmente y

posteriormente se realizó una difusión interna sobre la grilla ortogonal para ingresarlo al modelo como archivo “.dep”.

Aportantes de flujos

Se encontró a través del informe EULA, que existen al menos 4 entradas a la laguna, consideradas como fuentes difusas, de todas estas no se conocen las tasas de ingreso, por esta razón fueron descartadas del cálculo de flujos de entrada. Para los cálculos de flujo de entrada se trabajó en base al método racional de hidrología (ecuación 5). Los flujos aportantes de entrada al cuerpo de agua (Q_e), corresponden a las intensidades de precipitaciones (i), que se generaron durante el periodo de estudio, los coeficientes de escorrentía (C_e) y áreas de drenaje (A_d) respectivas, se encuentran en la bibliografía mencionada.

$$Q_e = C_e * i * A_d \quad (5)$$

Para los cálculos de flujos de salida (Q_s) se utilizó la ecuación de Manning (ecuación 6) para un canal cerrado circular, las propiedades específicas del canal se obtuvieron desde el Plan maestro de aguas lluvias. Donde $A_{(h)}$ corresponde al área mojada, $P_{(h)}$ al perímetro mojado, S a la pendiente de la línea del agua y n al coeficiente de manning.

$$Q_s = \frac{1}{n} * \frac{A_{(h)}^{5/3}}{P_{(h)}^{2/3}} * S^{1/2} \quad (6)$$

Viento

La serie de tiempo del viento que se utilizó, se extrajo desde los datos del informe “Agua, situaciones de emergencia, factibilidad técnica para el abastecimiento de agua potable desde un sistema de lagunas urbanas” estos agregados al archivo “.wnd” en la misma escala de tiempo, de cada 10 minutos.

Intercambio de calor y temperatura

El intercambio de calor se modeló usando el proceso de “*Heat flux Model, Radiation Total*” y “*Murakami Model*”, que calcula la radiación efectiva y pérdida de calor por causa de la evaporación y convección. Para esto fue necesario agregar: Temperatura, Radiación absoluta, Humedad relativa y Porcentaje de cobertura de nubes para el primer modelo, *Murakami Model*, por otro lado, debe ingresar: Temperatura, Radiación absoluta, Humedad relativa y Disco Secchi. Estos archivos se ingresan como la extensión “.tem”.

5.4.3. Procesos de calibración y validación del modelo hidrodinámico.

La calibración y validación del modelo, consiste en generar un modelo estable que garantice los escenarios de estudio, esto es posible en base a las herramientas de análisis estadístico y matemático. En este sentido, se utilizó el módulo QUICKPLOT de DELFT3D que se enlaza directamente con MATLAB, con el propósito de extraer y analizar los datos de extensión “.dat” donde se alojan los resultados de la modelación. Posteriormente el criterio de ajuste fue dado tanto por la herramienta matemática “Cost function” (C_x), como por Error cuadrático medio (ECM) y Error absoluto medio (EAM) (Blauw et al., 2009; Los, 2009), ver las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente.

C_x , ecuación 7, se basa en el análisis adimensional del modelo en series de tiempo con respecto a los datos observados. Se tiene que O_x equivale al valor observado de la variable x y P_x corresponde a los datos modelados de esta misma, n a la cantidad total de datos en el análisis, r_x corresponde al coeficiente de correlación lineal entre P_x y O_x , sd_x corresponde a la desviación estándar de los datos observados y por último, c es una constante de valor 0,5. El valor de C_x esta entre 0 e infinito, es por esto que Moll & Radash (2003) establecieron un criterio sobre el ajuste de los datos con respecto a C_x , visto en la tabla 5-4. Se puede observar que en un buen ajusté C_x se encuentra entre 0 y 1 por otro lado, un valor sobre 3 se considera como una modelación pobre.

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n |P_{xi} - O_{xi}|}{n} sd_x((1 - c) + c(1 - r_x)) \quad (7)$$

Tabla 13. Criterio de ajuste de Cost Function (Cx).

Rating de ajuste	Condición
Muy bueno	$0 < C_x \leq 1$
Bueno	$1 < C_x \leq 2$
Razonable	$2 < C_x \leq 3$
Pobre	$3 < C_x$

Fuente: Obtenido de Blauw et al. (2009)

Mediante los estadísticos RMSE (Root meaning squared error/ Raiz del error cuadrático medio) y EAM (Error Absoluto Medio), se observan directamente las medidas de error entre dos variables. Así EAM (ecuación 8) describe la diferencia absoluta entre lo modelado y lo observado, ECM (ecuación 9) apoya a esta relación anterior mostrando la contribución o el peso que posee el error en la modelación, por lo tanto, un valor de EAM y RMSE cercano a cero demostrará un buen ajuste de las variables modeladas.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |P_{xi} - O_{xi}|}{n} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |P_{xi} - O_{xi}|}{n}} \quad (9)$$

5.5. Proceso de modelación de calidad de agua y ecológica.

El proceso de modelación ecológica en base al modelo DELFT3D, se realizó a través del módulo ECO y permite establecer los criterios de crecimiento de diferentes grupos desarrolladores de bloom, entre ellos, encontramos a la *Microcystis*, en la cual se encuentra configurado específicamente condiciones quimiotróficas para su desarrollo. Un resumen del proceso de modelación ecológica puede verse en la Figura 5-3.

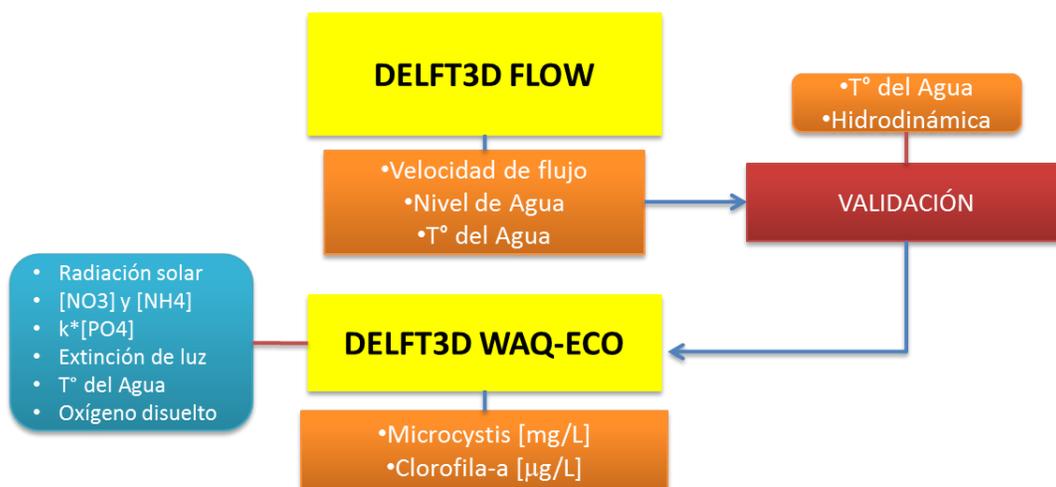


Figura 7. Esquema simplificado de las etapas de la modelación de bloom algal.

Fuente: Elaboración Propia.

Si bien, el modelo de calidad no puede validarse, por la ausencia de tasas de entrada de nutrientes al lago, no es posible realizar un análisis acabado de la dinámica de los procesos. A pesar de ello se estableció una serie de supuestos, para realizar un análisis sobre la formación de floraciones algales.

Según se observa en los datos de muestreo, fósforo (PO_4^{-2}) es el nutriente limitante en la formación de *Microcystis* de la laguna Lo Galindo. Se consideró a la precipitación como el principal motor de transporte hacia la laguna, por ende, se estableció una tasa de entrada de 0,01 [mg/L] de fósforo con un factor multiplicador k y una tasa de entrada constante de 2 [mg/L] en nitrógeno y 0,02 [mg/L] para amonio. Sobre el factor multiplicador k , este se aumentó en medida de encontrar un efecto de bloom, con un umbral de Clorofila- α de 150 [μ g/L].

Los puntos seleccionados para la caracterización de las concentraciones de Clorofila- α y *Microcystis*, fueron los mismos seleccionados para el análisis de los patrones de mezcla, bajo los diferentes escenarios establecidos.

5.5.1. Ecuaciones de calidad de agua.

DELFT3D-WAQ, es el módulo encargado de realizar el balance de masa estequiométrico de las sustancias reactivas o el intercambio molecular entre las sustancias reaccionantes. Las interacciones dependen de la naturaleza de los procesos, se observa en el esquema de la Figura 8.

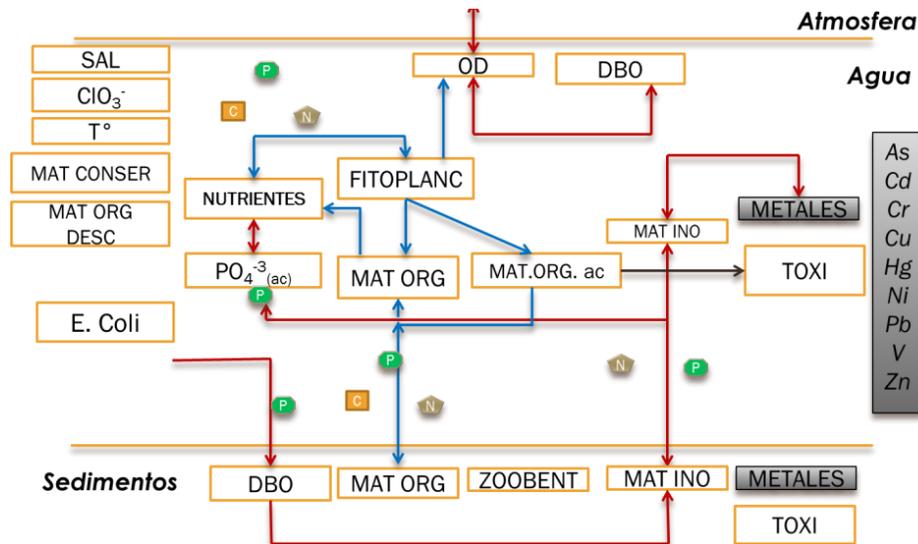


Figura 8. Esquema general del modelo de Calidad DELFT3D- WAQ. Las direcciones muestran las principales interacciones. (Flechas azules; Procesos químicos, Flechas rojas; Procesos biológicos)

Fuente: Elaboración Propia

Otra característica importante del modelo, es el desarrollo sobre los conceptos adaptativos a las variadas condiciones que existen alrededor del desarrollo de Blooms. Por ejemplo, las ecuaciones se desarrollan en diferentes perfiles de especies taxonómicas, para cada modelo de especies desarrolladoras de Bloom existen características que representan las condiciones limitantes del tipo nitrógeno (N-type), fósforo (P-type) y Energía (E-type). Por lo tanto, cada tipo de especie tiene diferentes características para la fijación de nutrientes, tasas de crecimiento, mortalidad y sedimentación. Estas limitaciones dependen de las variaciones inter-específicas que posee el modelo de Bloom en DELFT3D-ECO.

Ecuación de Transporte

La ecuación 10, representa la ecuación de transporte, estas representan las cargas de sustancias, así como varios procesos cinéticos o reactivos de calidad del agua y procesos ecológicos. C representa la concentración en [Kg/m³], además (u, v, w) hacen referencia a las componentes del vector de velocidades medidos en [m/s], (D_x, D_y, D_z) son los coeficientes de dispersión en los ejes (x,y,z) en [m²/s]. S representa las cargas añadidas desde los sumideros y desde las condiciones de borde. Las reacciones u otros procesos de transformación que presenta la ecuación, están dadas por la letra P.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S + P \quad (10)$$

5.5.2. Ecuaciones Ecológicas.

DELFT3D-ECO es el módulo ecológico del programa DELFT3D, contiene un sofisticado modelo de algas generadoras de Bloom, identificando diferentes especies, entre ellos diatomeas, cianobacterias y de diferentes géneros desarrolladoras. Además, puede utilizarse para simulaciones de eutrofización en donde existan varios grupos de especies de algas que compitan entre sí.

Los procesos ecológicos involucrados en el modelo del ecosistema, puede verse un esquema más detallado de interacciones del proceso en Figura 8. El módulo Delft3D-ECO además, puede realizar criterios especiales para cianobacterias y en específico para las concentraciones de *Microcystis* en el cuerpo de agua, es por eso que diversos autores han utilizado esta herramienta para la comprensión de las floraciones algales. (Los, 2009; Medrano et al., 2013)

Extinción de la Luz

La producción primaria es fuertemente influenciada con la disponibilidad de luz existente en la columna de agua, llegando a ser en muchas ocasiones un factor limitante en la misma. La ecuación 11, muestra que la extinción de la luz (I_z), donde I_0 es la radiación solar en $[W/m^2]$, E_l corresponde al coeficiente de extinción de luz $[m^{-1}]$ y z corresponde a la profundidad en unidades de $[m]$.

$$I_z = I_0 \exp(-E_l z) \quad (11)$$

Balance de Nutrientes

La concentración, C_i , de un nutriente i en la columna de agua es definida como la ecuación (12), donde n_{ik} es el requerimiento de una especie k para un nutriente i , d_i y w_i son la cantidad de nutriente en algas muertas y disueltas en la columna de agua y B_k el presupuesto general de energía de una especie k respectivamente.

$$C_i = \sum_k (n_{ik} B_k) + d_i + w_i \quad (12)$$

Reciclado de Nutrientes

La tasa de cambio de d_i está dada por la ecuación (13) Donde f_p es la fracción de células de fitoplancton muertas, M_k es la tasa de mortalidad de la especie k , m_i es la constante de remineralización del nutriente i y s es la constante de sedimentación de las células muertas. M_k y m_i son dependientes de la temperatura.

$$\frac{\partial d_i}{\partial t} = \sum_k (f_p M_k n_{ik} B_k) - m_i d_i + s d_i \quad (13)$$

Energía limitante

La respuesta del fitoplancton a la luz muestra variaciones mucho más fuertes en comparación con otros recursos. Esta variación se debe a los cambios del nivel de irradiancia en tiempos muy cortos (oscilación entre día y noche), también a la profundidad a la que el fitoplancton se expone a la luz y a las diferencias en la reacción a la luz de diferentes especies. El modelo en lugar de una relación funcional entre las intensidades de luz y las tasas de crecimiento, utiliza una tabla de consulta para cada especie que se construye utilizando conjuntos de datos

experimentales que consisten en el factor de eficiencia correcto E_k para cualquier condición de luz. El presupuesto general de energía, B_k , se describe en la ecuación 14. Donde Pg_k^{max} es la tasa de crecimiento bruta máxima, M_k y R_k son tasas de mortalidad y respiración respectivamente.

$$\frac{\partial B_k}{\partial t} = (Pg_k^{max} E_k - M_k - R_k) B_k \quad (14)$$

El coeficiente específico de extinción de luz para algas vivas de especie k se denomina K_k y la extinción total debida a la materia viva total está dada por la ecuación 15).

$$KL = \sum_k (K_k B_k) \quad (14)$$

Del mismo modo, suponiendo que la extinción de la luz también se vea afectada por concentración de algas muertas, fracción e_d , fracción proveniente entre la extinción de las algas vivas de la misma especie. Se conforma en la ecuación 16, de extinción total debida a material muerto.

$$KD = e_d \sum_k (K_k f_p M_k B_k) \quad (16)$$

Para una especie k a un cierto valor de la extinción media K_k^{max} , el crecimiento neto de esta especie es exactamente cero. Por otro lado, cuando la extinción está en un valor mínimo K_k^{min} , la intensidad de la luz se vuelve demasiado alta y produce la existencia de foto-inhibición que da como resultado bajas tasas de crecimiento. Esto se expresa en la ecuación 17. Donde, KW es la extinción debida a todos los demás materiales en el agua, Si el total de la extinción sale fuera de este rango, entonces B_k será cero.

$$K_k^{min} \leq KL + KD + KW \leq K_k^{max} \quad (17)$$

Crecimiento y mortalidad limitante

Cuando las condiciones ambientales (tales como las concentraciones de nutrientes) aumentan a una tasa mayor que la tasa de crecimiento potencial de una especie k , la especie puede no alcanzar el nivel al cual la luz o un nutriente se limita en un paso de tiempo del modelo. Para esto, en el modelo durante proceso de optimización se establecen límites para determinar el incremento máximo de biomasa dentro del intervalo de tiempo. Las pérdidas son bajas durante el crecimiento exponencial y la mortalidad, por tanto, estas pueden ser ignoradas en el cálculo de esta restricción. Para una especie de algas k la concentración máxima posible de biomasa B_k^{max} está dada por la ecuación 18. Donde B_k^0 es la concentración inicial al comienzo del intervalo, p_{nk} está definida en la ecuación 19

y representa la constante de la tasa de producción neta. Por su parte Δt representa el paso del tiempo en el modelo.

$$B_K^{max} = B_k^0 \exp(p_{nk} \Delta t) \quad (18)$$

$$p_{nk} = P g_k^{max} E_k - R_k \quad (19)$$

Cuando las condiciones ambientales disminuyen rápidamente, la disminución en la concentración de biomasa se restringe. Para evitar la eliminación completa de una especie dentro de un paso de tiempo de modelación, la biomasa mínima de la especie k , definido como B_k^{min} , se obtiene asumiendo que no hay producción sino sólo mortalidad, visto en la ecuación 20. Este valor mínimo se calcula para cada tipo de una especie k , por lo tanto, la máxima mortalidad posible no puede ser excedida. Esto ocurre cuando se produce un conflicto entre las condiciones sobre la mortalidad y la energía existente, de tal manera que la disponibilidad de la luz cae repentinamente, exigiendo que la biomasa sea pequeña.

$$B_K^{min} = B_k^0 \exp(-M_{nk} \Delta t) \quad (20)$$

5.5.3 Configuración del modelo de calidad y ecológico.

Nutrientes

Se añadieron las variables de nutrientes que consisten en fosfato, nitrato y amonio, a estas variables se les indicaron los procesos de: Descomposición Orgánica, Detritus, Mineralización, Nitroficación y Amonificación. Guardados en el archivo Bloom_Microcys.0 y Bloom_Microcys.sub.

Microcystis

Con respecto al crecimiento de la microalgas perteneciente al fitoplancton, se consideró solo al grupo de Cyanobacteria y en específico al género de *Microcystis*. Los archivos de modelación ecológica están insertos en los archivos: Bloom_Microcys.0 y Bloom_Microcys.sub. Posteriormente, se acoplaron en el input de extensión “.scn”, “.par” e “.inp”.

Análisis de dinámicas de crecimiento

Finalmente como última etapa, se compararán las variables utilizadas como parámetros forzantes (Temperatura del aire, temperatura del agua, viento, Fosfato,

Nitrato, entre otros...) con las tasas de crecimiento de *Microcystis*, obtenidas a partir de la modelación ecológica, ésta se evalúa a través del Coeficiente de Correlación Lineal Pearson (Ecuación 21). A partir de esta ecuación se determinó cuáles variables son capaces de determinar el alto crecimiento de *Microcystis* desde el punto de vista de la modelación numérica. Donde ρ_{xy} es Coeficiente de Correlación de Pearson, Cov_{xy} representa la covarianza entre la variable x e y, finalmente los valores de σ_x e σ_y , son las desviaciones típicas de las variables x e y por si solas.

$$\rho_{xy} = \frac{Cov_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (21)$$

Posteriormente, se seleccionó el periodo de máximo crecimiento y más extenso de la microalga *Microcystis*, es decir, el periodo con mayor concentración de clorofila-a, esto bajo el supuesto de investigación; Bajo un periodo de floración algal, la biomasa generada corresponde en su totalidad a la presencia del grupo formador, en este caso a *Microcystis*. Al periodo seleccionado se le realizó el mismo análisis de proporcionalidad lineal de las variables, a través del coeficiente de correlación, para entender la dinámica de floración sobre las variables utilizadas en la modelación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1. Caracterización limnológica de Laguna Lo Galindo.

6.1.1. Estado trófico.

A través del análisis de la base de datos de los años 2011-2014, se confirma el estado avanzado de eutrofización de la laguna Lo Galindo (Tabla 14), esto ya que los parámetros de calidad del agua tales como fósforo, nitrógeno y clorofila total, superan los índices para evaluar el estado de los sistemas lacustres, establecidos por la Guía CONAMA para la elaboración de Normas Secundarias en Chile, ver Anexo 2 (EULA, 2012).

Tabla 14. Estado trófico 2011-2014, según guía CONAMA.

Parámetros de evaluación	Promedio	D.S	Estado Trófico
Disco Secchi [m]	0,35	0,16	Eutrófico
DBO5 [mg O ₂ /L]	16,73	16,67	Mesotrófico
Fósforo total [mg/L]	0,29	0,17	Eutrófico
Nitrógeno total [mg/L]	3,25	2,42	Eutrófico
Clorofila- α [μ g/L]	175,72	88,06	Eutrófico

Fuente: Elaboración Propia

Nutrientes

Un aspecto importante, es la comprensión de la disponibilidad de nutrientes para las productividades primarias, para ello se muestra en la Tabla 15, la composición de estos nutrientes existentes en la columna de agua. Se observa que las concentraciones que derivan de N, nitrógeno, son mayores que las concentraciones que derivan de P, fósforo, en la Laguna Lo Galindo. De esta

forma, la relación que existe entre los nutrientes de N y P promediada, fluctúa a razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ de 8,78 (Tabla 16). Se desprende que PO, se considera un reactivo limitante para las operaciones fisiológicas de los organismos fotosintéticos.

Tabla 15. Nutrientes presentes en Laguna Lo Galindo, 2011-2014.

Nutrientes					
Parámetros	n	Max	Min	Promedio	Desviación estándar
Nitrógeno total [mg/L]	32	13,63	1,27	3,25	2,42
Nitratos [mg/L]	67	35,27	0	1,60	4,34
Nitritos [mg/L]	66	3,46	0	0,09	0,43
Amonio [mg/L]	32	3,46	0,03	0,22	0,61
Fósforo total [mg/L]	26	0,70	0,09	0,29	0,17
Orto-fosfato [mg/L]	66	2,80	0,09	0,29	0,17

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16. Relación de N-P presente en Laguna Lo Galindo, 2011-2014.

Relaciones de nutrientes					
Relación	n	Max	Min	Promedio	Desviación estándar
Razón TN:TP	25	38,71	4,64	13,30	7,82
Razón de $\text{NO}_3:\text{PO}_4$	42	110,875	0,08	8,78	20,51

Fuente: Elaboración Propia

6.1.3. Factores Físico-Químicos.

Dentro de las mediciones realizadas entre 2011-2014, existen otros parámetros tanto físicos como químicos de los cuales se pueden desprender ciertas cualidades de la Laguna Lo Galindo, Tabla 17. Por ejemplo, un pH promedio básico de 8,21 demuestra que el cuerpo de agua tiende a ser productivo, esto se

debe a la captura de protones del cuerpo de agua parte de los productos $(\text{CH}_2\text{O})_n$ de la reacción de fotosíntesis, que desplaza el equilibrio químico a un sistema básico, otro valor que reafirma la alta productividad del cuerpo de agua, es la alta presencia del pigmento clorofila- α , un indicador de biomasa, que a mayor cantidad de este pigmento en la columna de agua mayor será la presencia de biomasa (Fabre et al., 2010).

Disco Secchi, es una medida que representa la turbidez del cuerpo de agua dicho de otra forma es, la cantidad de luz observable que pueda tener la columna de agua desde la superficie hasta el punto donde no pueda observarse el objetivo sumergido, en unidades métricas. El promedio extraído de la base de datos muestra 35 [cm] lo cual se trata de una turbidez alta, este es uno de los efectos que genera la floración algal en los cuerpos de agua además, se demuestra un periodo de una mayor turbidez en la columna de agua con una mínima de hasta 12 [cm] de observación del Disco Secchi.

La Temperatura del Agua, es un factor muy ligado al desarrollo de los metabolismos en el cuerpo de agua, pues acelera o frena las reacciones químicas que sustentan la producción primaria. Se encontraron temperaturas mínimas de 3,76 [°C], ubicadas principalmente en épocas de invierno, que aumentan gradualmente con los periodos estacionales Primavera Verano y decaen posteriormente en Otoño-Invierno, con magnitudes de 28,74 [°C].

Tabla 17. Otros parámetros en Laguna Lo Galindo, 2011-2014.

Parámetros Físicos-Químicos					
Parámetros	n	Max	Min	Promedio	Desviación estándar
pH	118	10,07	6,87	8,21	0,67
Clorofila- α [$\mu\text{g/L}$]	16	435,94	79,10	175,72	88,06
Disco Secchi [m]	14	0,60	0,12	0,35	0,16
Temperatura del Agua [$^{\circ}\text{C}$]	26287	28,74	3,76	15,65	5,50

Fuente: Elaboración Propia

6.1.4. Factores Meteorológicos.

a) Precipitación: Tuvo un promedio anual de precipitaciones de 909 [mm], presentando marcadas diferencias de precipitaciones entre los meses invernales y estivales. Las mayores acumulaciones de estas precipitaciones se encuentran entre Mayo y Agosto, periodo en el cual se aproxima el invierno, representan un 74,3% de las precipitaciones anuales. Por otro lado, los periodos más secos del año corresponden a los meses de Noviembre a Enero, los cuales representan un 7,5% del total de las precipitaciones. Por lo tanto, los mayores aportes de alimentación a la Laguna Lo Galindo, corresponden a los meses invernales. En la Figura 9, se puede apreciar el gráfico de barras que representa las precipitaciones medias mensuales, en la cuenca de la Laguna Lo Galindo.

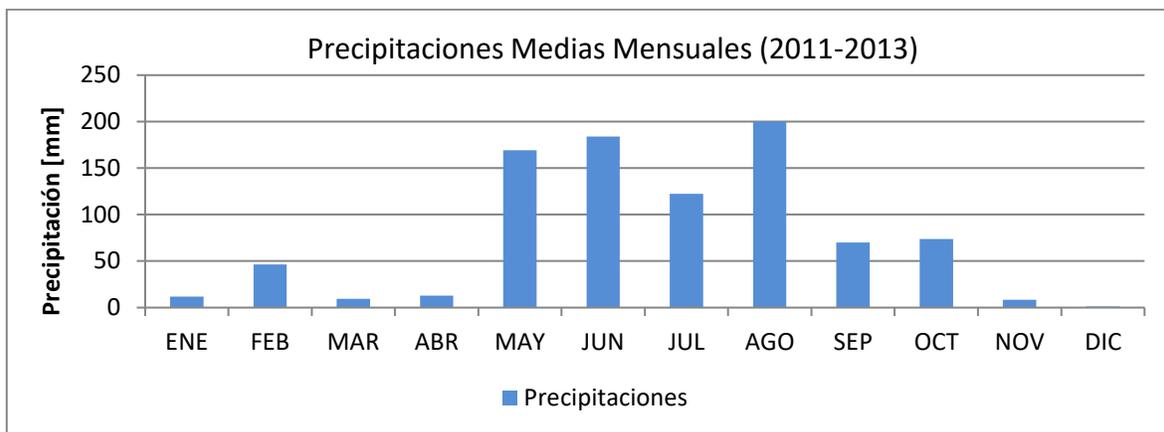


Figura 9. Precipitaciones medias mensuales (2011-2013).

Fuente: Elaboración Propia.

b) Velocidad del viento: Se encontraron fluctuaciones desde una mínima de 0,63 [m/s] a una máxima de 4,64 [m/s] en las velocidades medias diarias de viento (Figura 10). En general, las fluctuaciones de viento no sobrepasan los 3 [m/s] a lo largo de todo el año, pero existen superávits de estas velocidades con mayores magnitudes entre Mayo y Junio (4,24 - 4,64 [m/s]), durante el periodo invernal y primaveral se sostienen estos pics hasta Octubre, donde posteriormente disminuyen. Las magnitudes más bajas se ubica en Febrero, Abril y Octubre y en promedio no superan los 2 [m/s] durante el mes.

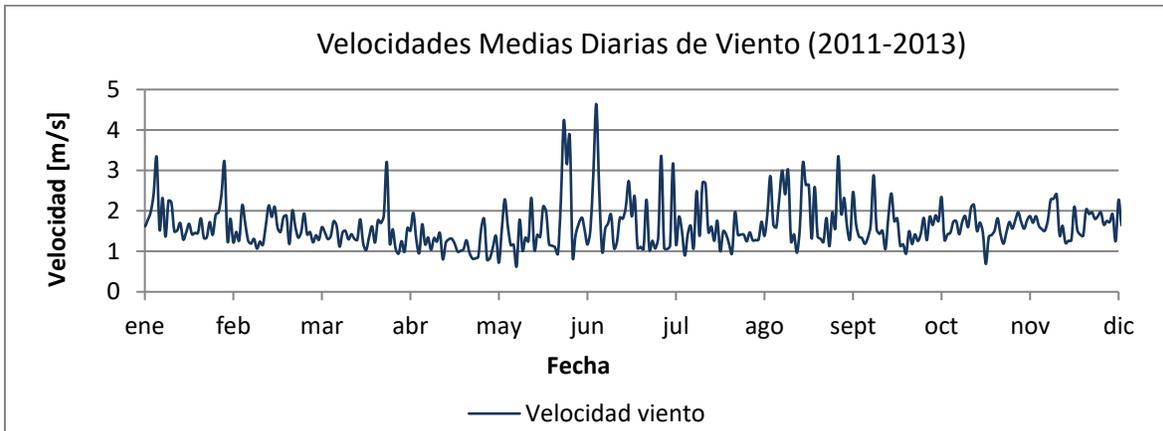


Figura 10. Velocidades medias diarias de viento (2011-2013).

Fuente: Elaboración Propia.

c) Dirección del viento: Las direcciones medias diarias del viento poseen una preferencia desde sur a norte, 21,6% de preferencia en este sentido (Figura 11), otras preferencias direccionales son intermediarias entre S-E y S-W, pero siempre predominante desde el eje sur hacia norte.

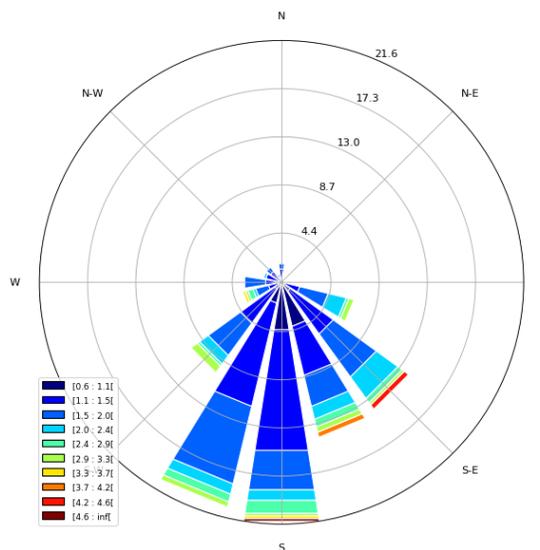


Figura 11. Direcciones medias diarias de viento (2011-2013).

Fuente: Elaboración Propia.

d) Temperatura Ambiental: Las temperaturas ambientales en promedio están entre los 13,09 [°C] (Figura 12), son estrechamente relacionadas con los periodos estacionales, encontrándose una máxima en Marzo, transición verano-otoño, de 21,86 [°C] y una mínima de 4,17 [°C] en Julio, época de invierno.

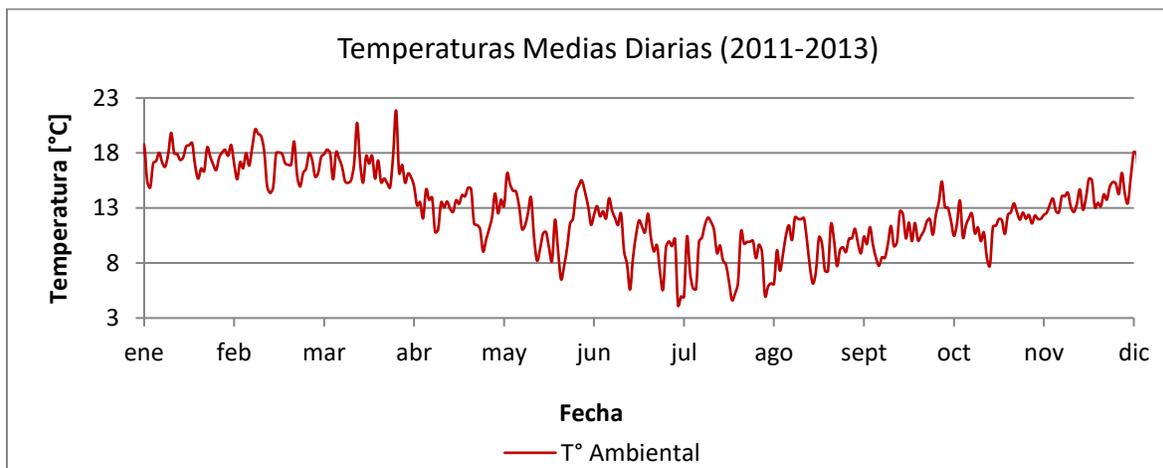


Figura 12. Temperaturas medias diarias (2011-2013).

Fuente: Elaboración Propia.

6.2. Modelación.

6.2.1. Cálculos requeridos y supuestos utilizados.

La modelación hidrodinámica y de calidad de agua requiere de una gran cantidad de información, la cual no siempre estuvo disponible. A causa de esto, nace la propuesta de supuestos que permitieron una mejor aproximación de las condiciones reales del sistema. En esta sección se presentan las principales consideraciones utilizadas en el modelo hidrodinámico.

Morfología

En base a la morfología del lago, se construyó una malla curvilínea horizontal, a través del módulo RGFGGRID, del modelo DELFT3D. Esta puede verse en la Figura 13 (Izquierda). Posteriormente, se creó la batimetría correspondiente (Figura 13 (Derecha)), mediante la interpolación triangular, de los archivos ".xyz" de altura, obtenidos de EULA (2012).

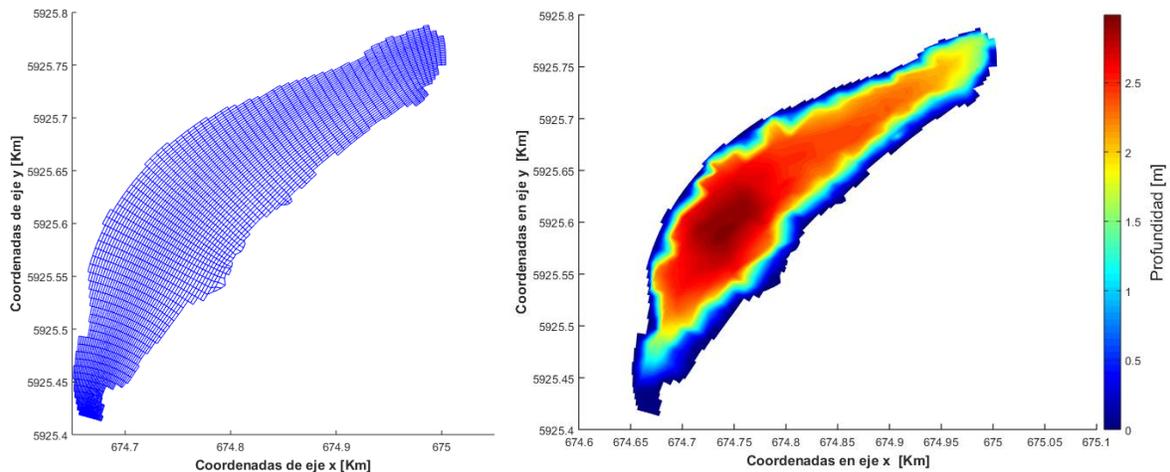


Figura 13. Grilla de cálculo (Izquierda) y batimetría (Derecha)

Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente, se consideró la presencia de macrófitas, las cuales impedían el paso regular de los flujos, tanto de entrada y de salida, para ello también se construyó un archivo que representa numéricamente esta suposición en base a la rugosidad, vista en la Figura 14. Por lo tanto, La rugosidad existente en la laguna no es regular, esto pudo identificarse en la etapa iterativa de calibración y en la

visita al lago, expresada en valores de Chezy de unidades $[m^{1/2}/s]$, donde la unidad de Chezy menor fue 2 $[m^{1/2}/s]$ y máxima 20 $[m^{1/2}/s]$.

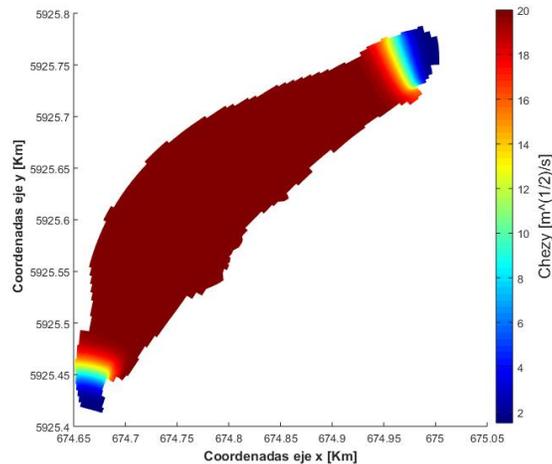


Figura 14. Rugosidad ajustada a la malla de cálculo en Laguna Lo Galindo.

Fuente: Elaboración Propia.

Flujos de entrada

En los cálculos realizados en el método racional de hidrología sobre las áreas de drenaje (Figura 15), se desprende que el caudal de ingreso de las áreas, área de drenaje directa y espejo de agua, representa valores cercanos al 10% de las tasas globales. Debido a esto, el supuesto realizado es; El lago solo recibe aportantes de aguas lluvia con tasas desconocidas de nutriente y además, estas ingresan al sistema por medio del colector de aguas lluvia establecidos por el MOP.

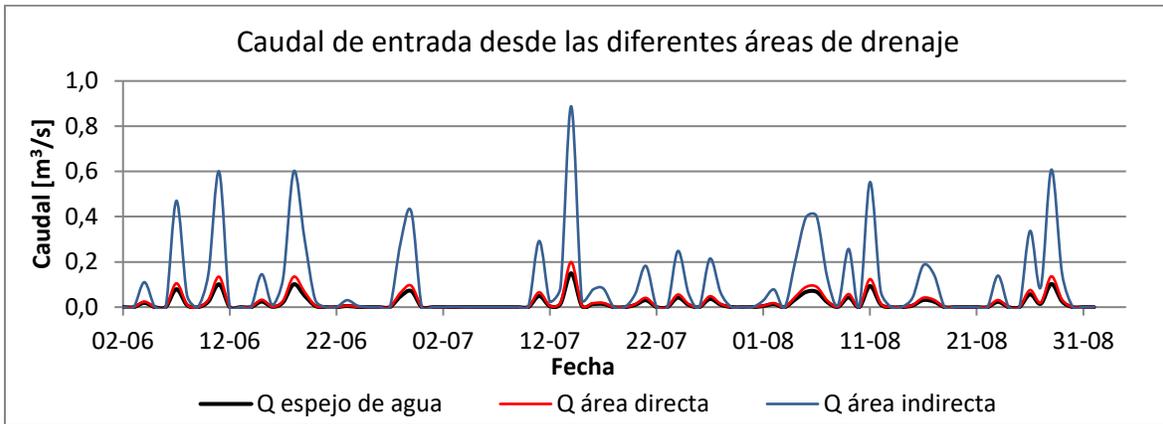


Figura 15. Gráfico de caudal de entrada en sus diferentes áreas de drenaje.
Fuente: Elaboración Propia.

Flujos de salida

Debido al desconocimiento de los flujos tanto de entrada como de salida, se estableció el siguiente criterio: Los caudales de salida estarían expresados en función del tirante hidráulico de la ecuación de Manning para un canal circular cerrado. Es decir, el caudal de salida depende de cuan alto sea el nivel del agua. Los resultados son expresados en la Figura 16.

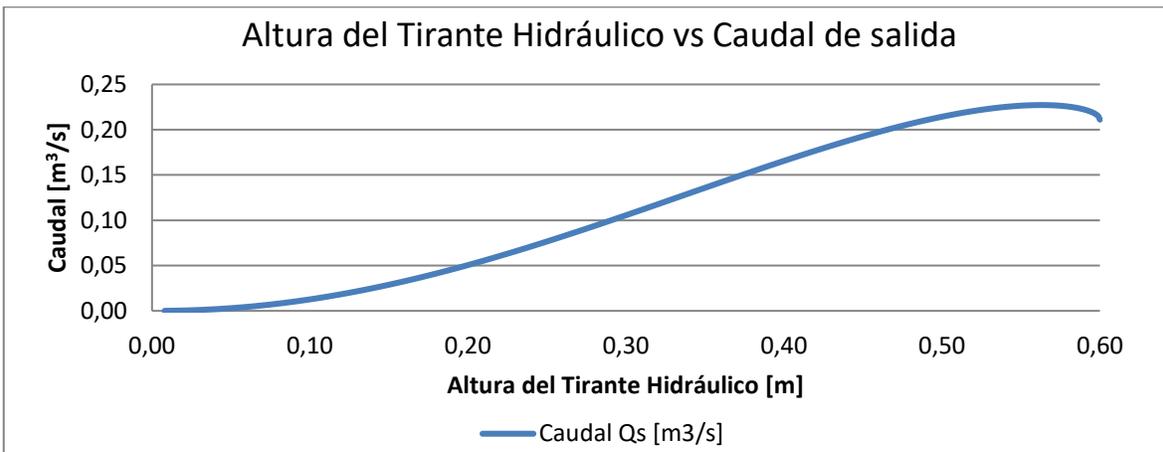


Figura 16. Gráfico de caudal de salida vs tirante hidráulico, del canal de salida.
Fuente: Elaboración Propia.

6.2.2. Calibración Hidrodinámica.

La calibración del modelo se desarrolló mediante la comparación entre los valores observados y modelados, a través de las diferencias del nivel de agua y temperatura del agua de laguna Lo Galindo. Los datos observados correspondientes, son desde el 2 de Junio al 22 de Julio y fueron obtenidas de la base de datos del informe elaborado por centro EULA el año 2012. El punto de comparación se ubica en la celda 36-36, la cual se asemeja a la ubicación del sensor de temperatura y presión. En la Figura 17 y en la figura 18. Se aprecia la comparación de las simulaciones versus los datos observados, sobre los resultados de los estadísticos, ver Tabla 18. Los resultados de temperatura del agua, fueron aquellos extraídos del modelo Murakami, debido a que los errores tanto para calibración (RMSE= 23,03% y EAM= 20,78%) y validación (RMSE= 13,24% y EAM= 11,40%), En cambio los resultados de Heat Flux Model Radiation Total, tuvo un error en calibración (RMSE= 25,20% y EAM=23,18%) y validación (RMSE= 17,72% y EAM=16,63%)

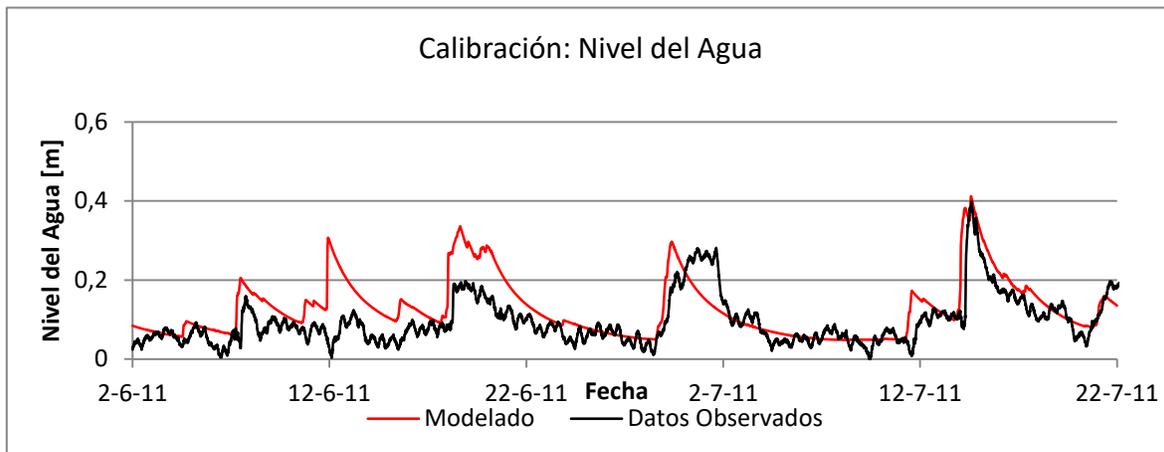


Figura 17. Simulación para calibración de Nivel del Agua.

Fuente: Elaboración Propia.

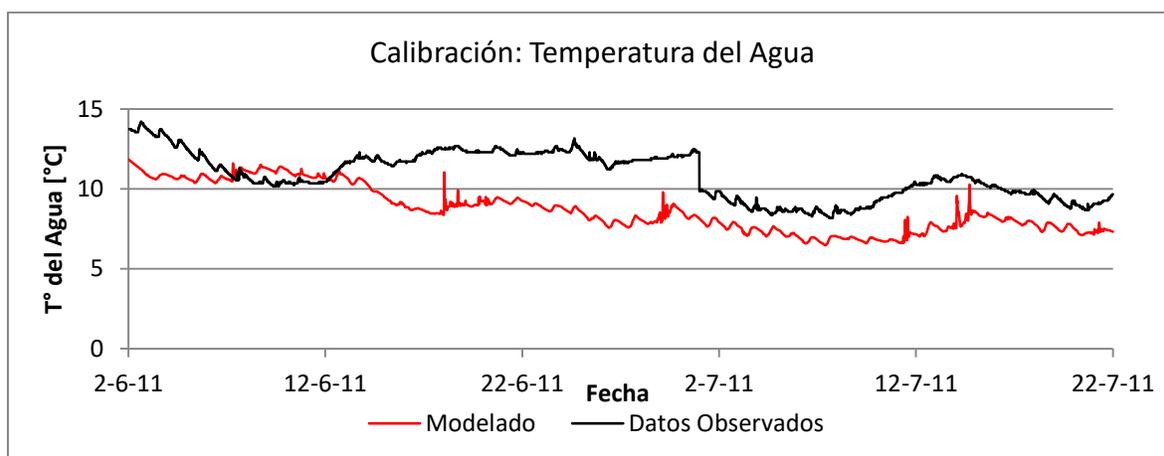


Figura 18. Simulación para calibración de temperatura del agua.

Fuente: Elaboración Propia.

Los estadísticos utilizados demuestran que la modelación logró un ajuste conforme a “Muy bueno” para la calibración de nivel del agua y “Bueno” para la calibración de temperatura, esto según el ranking de (Moll & Radash) en la

ecuación de Cf. Otorgando satisfactoriamente un modelo que logra entregar consistencia en sus resultados.

A este análisis se le añade la interpretación del error como RMSE y EAM, en el cual RMSE posee mayor peso sobre los errores, donde claramente esta tendencia se encuentra en los errores obtenidos tanto para simulación del nivel del agua y temperatura del agua. Los errores en el nivel del agua, respecto a la media aritmética de los valores observados, representan un 66% y un 46% de esta. A diferencia de la calibración de temperatura del agua, el error representa cerca del 20% de la media. Se desprende a través de la gráfica, que la simulación de temperatura tiende a no poseer correlación lineal favorable con un valor de 0,608, por lo tanto, justifica la ponderación solo de “Bueno” en el ranking de (Moll & Radash) para la bondad de las simulaciones. En consecuencia, es correcto realizar un análisis con diversos estadísticos, para una mayor comprensión del sistema simulado (Corres et al., 2009).

Tabla 18. Estadísticos en Calibración.

Precisión de pronósticos	Estadísticos				
	Cf	Ranking (R&M)	Media	RMSE	EAM
Calibración de Nivel del Agua	0,468	Muy Bueno	0,096	0,063	0,045
Calibración de Temperatura	1,456	Bueno	10,858	2,501	2,256

Fuente: Elaboración Propia.

6.2.3. Validación Hidrodinámica.

Validación de Escenario Julio-Agosto 2011

La validación del modelo se realiza al igual que en la calibración, en la comparación del nivel del agua y temperatura del agua observado, versus los valores simulados del modelo. El periodo de validación se realiza desde el día 22 de Julio del 2011 al 1 de Septiembre del 2011, en el mismo punto seleccionado para la calibración, debido a la existencia de solo un punto de muestreo ubicado en el sector más profundo de la laguna. Las comparaciones pueden observarse en la Figura 19 y 20, los resultados estadísticos ver en Tabla 19.

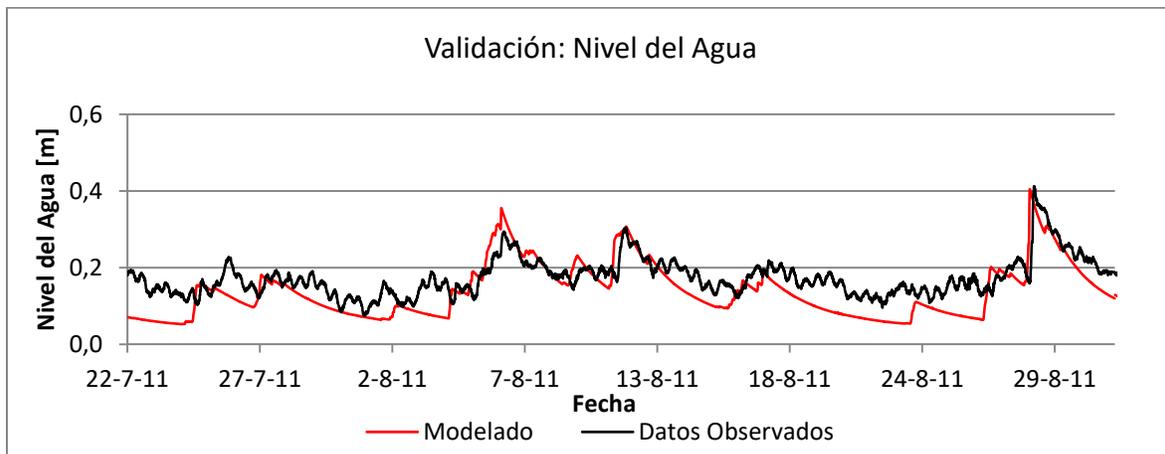


Figura 19. Simulación para validación del Nivel del agua.

Fuente: Elaboración Propia.

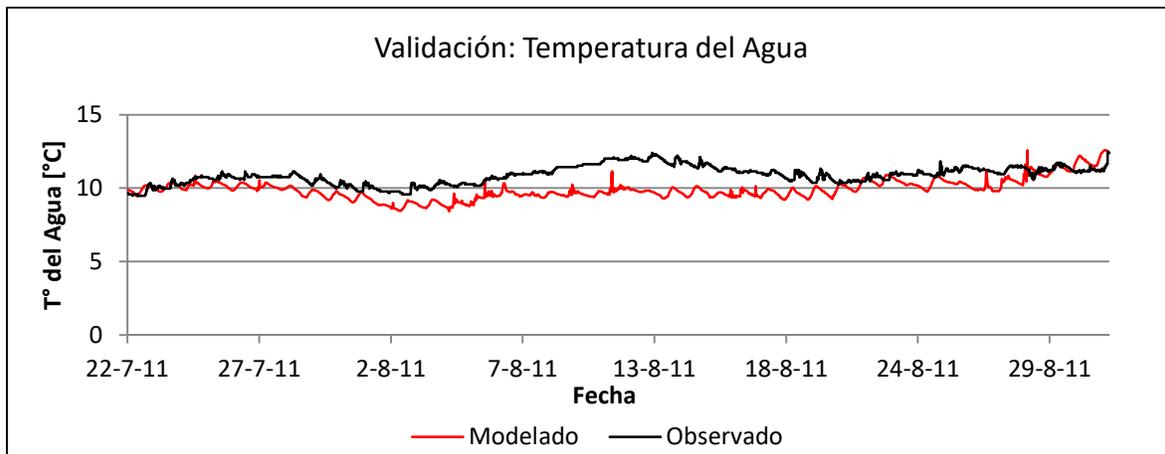


Figura 20. Simulación para validación de temperatura del agua.

Fuente: Elaboración Propia.

Los estadísticos analizados en la simulación para validación, resultaron con un “Muy bueno” y “Bueno” a la precisión de la simulación de nivel del agua y temperatura respectivamente, según el ranking de (Moll & Radash) realizado con el análisis de Cf. El indicador estadístico, demuestra una simulación exitosa para el nivel del agua, tanto en calibración como validación, a diferencia de las modelaciones realizadas para temperatura. Según Burger et al., (2008), las simulaciones en temperatura del agua en general, resultan con valores más fríos que los observados, si bien, se determina a partir de temperatura del aire, radiación, humedad, viento, cobertura de nubes y disco Secchi, esta posee una alta sensibilidad a múltiples variables, como la presencia de materia orgánica, composición de sedimentos, entre otras.

Por otro lado, el error absoluto medio en la temperatura obtenido de la simulación es 1,218 [°C] muy cercano a lo obtenido con la raíz cuadrática media del error

(1,415 [°C]), la diferencia se debe a la esencia de error cuadrático medio internalizado en la ecuación de RMSE, que penaliza los errores con mayor fuerza que el error absoluto medio (Corres et al., 2009).

Tabla 19. Estadísticos en Validación.

Precisión de pronósticos	Estadísticos				
	Cf	Ranking (R&M)	Media	RMSE	EAM
Validación de Nivel del Agua	0	Muy Bueno	0,096	0,055	0,046
Validación de Temperatura (2011)	1,123	Bueno	10,685	1,415	1,218

Fuente: Elaboración Propia

6.2.4. Validación de Calidad de Agua y Ecológica.

Validación de Escenario Enero-Abril 2013

Se realizó la validación de Enero-Abril 2013, la cual corresponde a los periodos estivales del área de estudio y consiguientemente poseen la mayor cantidad de datos de calidad de agua, desafortunadamente la naturaleza de los datos de calidad son inviables para realizar una validación numérica estadística. Por lo que solo se realizaron comparaciones visuales de los puntos simulados y observados.

a) Temperatura del Agua: Para comenzar la validación de calidad de agua en un escenario distinto, se presenta una validación hidrodinámica, para corroborar correctamente la ejecución de las variables en los patrones de mezcla. Vistas en la Figura 21.

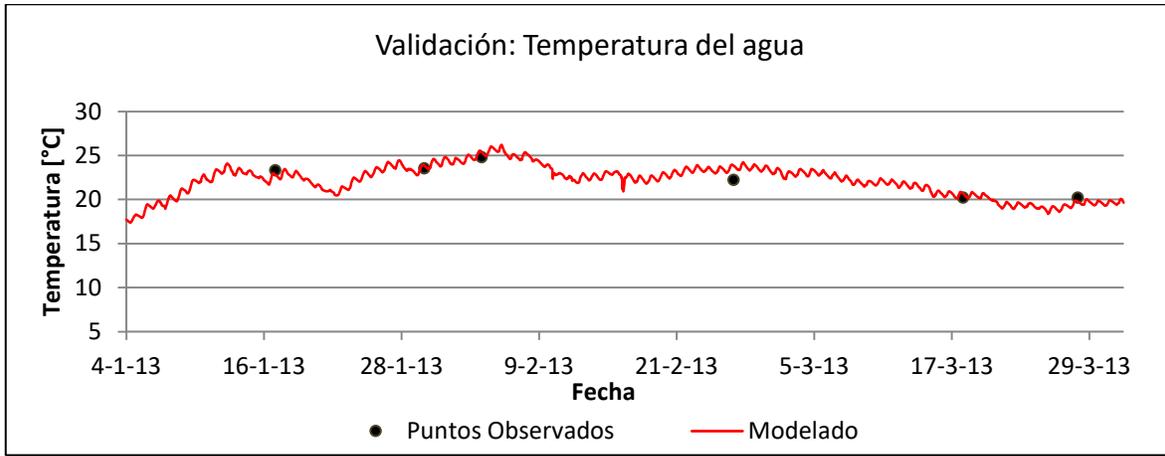


Figura 21. Simulación de Temperatura del agua 2013.
Fuente: Elaboración Propia.

b) Nutrientes: Se estimaron las concentraciones de nutrientes, a través de procesos iterativos al desconocer las concentraciones de entrada al Lago, asumiendo una tasa constante de $[\text{NO}_3]$ y $[\text{PO}_4]$ en exceso. Estas pueden ser vistas en la Figura 22 y 23.

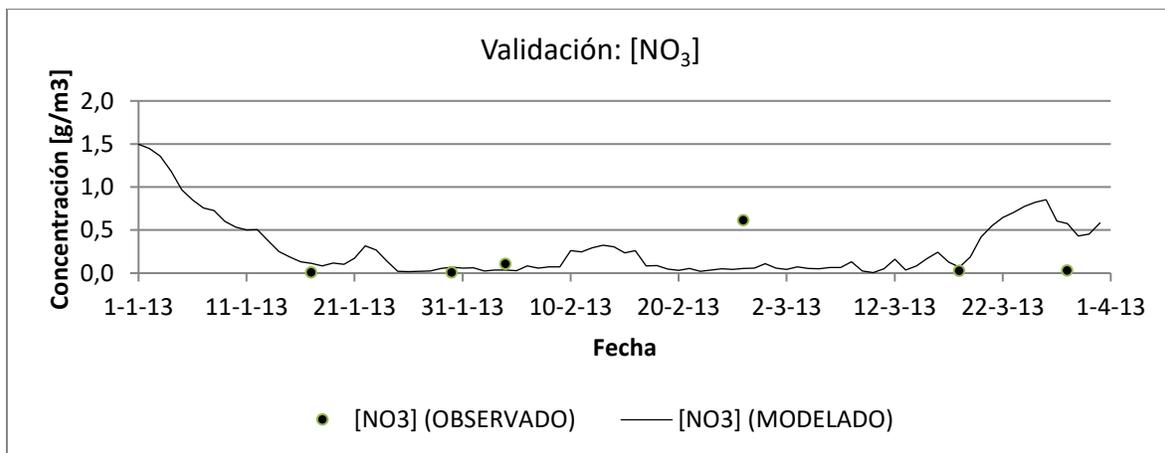


Figura 22. Simulación de concentración de NO_3 .

Fuente: Elaboración Propia.

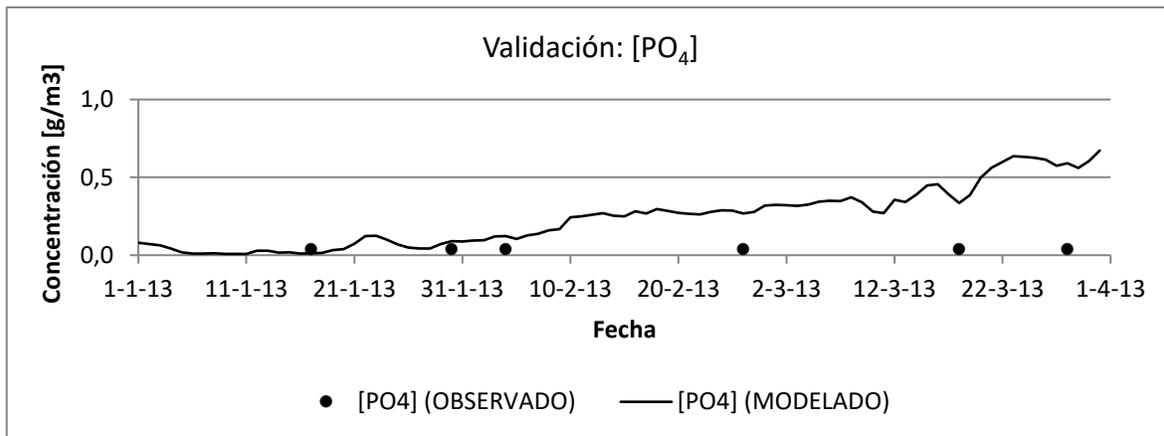


Figura 23. Simulación de concentración de PO₄.

Fuente: Elaboración Propia.

c) Biomasa: La concentraciones de biomasa están basadas en el pigmento de Clorofila- α , que posee estrecha relación con el crecimiento de la cianobacteria *Microcystis*, debido a que el supuesto establecido dice que: *Microcystis* es la única especie responsable del crecimiento excesivo de biomasa en el cuerpo de agua, por lo tanto, representa el crecimiento de *Microcystis* en unidades de biomasa. Los resultados del crecimiento de biomasa están en la Figura 24.

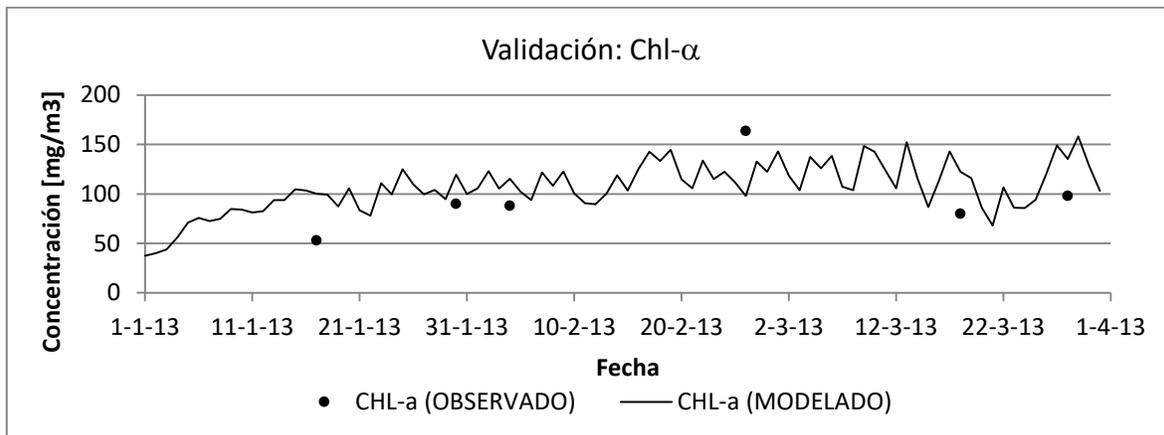


Figura 24. Simulación de concentración de Clorofila- α .

Fuente: Elaboración Propia.

6.3. Patrones de Mezcla.

6.3.1. Nivel del Agua.

Las variaciones del nivel del agua están directamente relacionadas con los aportes hídricos que tenga el cuerpo léntico de agua, para el caso de Laguna Lo Galindo con las precipitaciones (expresadas como un caudal de entrada). Además, los resultados muestran que para aquellos periodos que no existe precipitación las cotas del agua disminuyen hasta un mínimo de $-5,8 \cdot 10^{-5}$ [m] bajo la cota inicial y en contraste, cuando se efectuaron precipitaciones, los niveles de agua aumentaron su magnitud, llegando a un máximo de 0,394 [m] sobre la cota inicial.

6.3.2. Velocidad de flujo.

Las velocidades de flujo son expresadas como la resultante de las combinaciones de factores aportantes de momentum, masa y temperatura en el cuerpo de agua, en la Figura 25 se muestra un plano con el promedio de las simulaciones de velocidades de flujo en la Laguna Lo Galindo. Es posible identificar las zonas de mayor velocidad en los sectores laterales del cuerpo de agua, las mayores velocidades fueron de magnitudes 0,0711 [m/s], esto se explica por ecuación de continuidad o conservación de masa, donde la baja profundidad de las zonas laterales tienen un área más pequeña y una velocidad más elevada que áreas más profundas. Las menores velocidades están en el centro de la laguna y es posible encontrar en algunas celdas de cálculo magnitudes iguales a cero. Esto se debe a que, desde la celda donde se efectúan flujos de entrada, con una masa asociada y un vector de entrada asociado, se genera un esfuerzo de corte en el agua contenida y este a su vez provoca un efecto de vórtice por borde de la pluma (recorrido de flujo de entrada), este movimiento realiza un vector en sentido contrario al flujo de entrada y cuando ocurre la sumatoria de velocidades medias dentro una misma celda que contenga ambas componentes de velocidad contrarias, la resultante de esa velocidad media será cero o una velocidad muy próxima a cero.

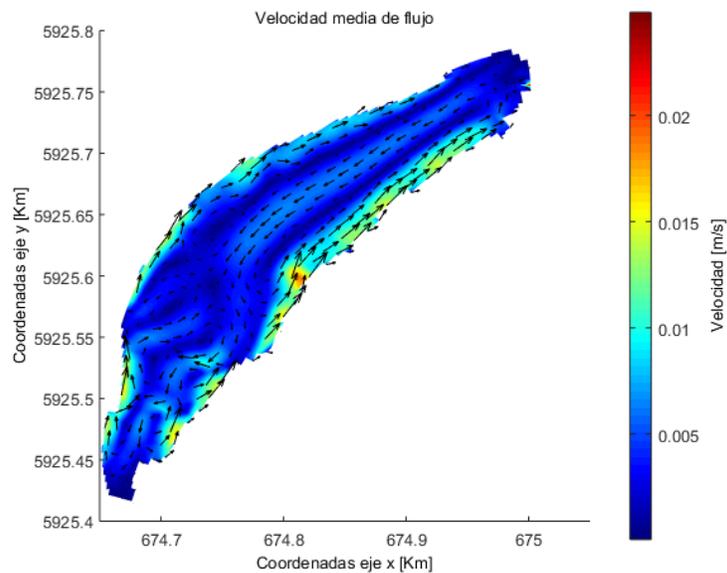


Figura 25. Promedio de simulaciones de velocidad media y sus vectores.

Fuente: Elaboración Propia.

6.3.3. Temperatura del Agua.

La temperatura del agua, se relaciona directamente con las variables de humedad, temperatura ambiental y radiación. Las fluctuaciones de temperatura siguen un orden estacional, esto se refiere a que en invierno alcanzan las temperaturas más bajas, del orden de 8,42 [°C] y las más altas se producen en periodos cercanos al estival con 23,60 [°C].

Los cambios de temperatura en el agua, pueden verse en Figura 26 de desviación estándar de las simulaciones, en esta gráfica se observa que los cambios de temperatura son mayores en la entrada del Lago, esto ocurre por la entrada de masa, precipitaciones, a diferente temperatura del agua de la laguna. El cambio

más alto se registra a una desviación estándar de 3,5 [°C] (extremo inferior). Posteriormente los cambios son más graduales hasta la salida del Lago (extremo superior).

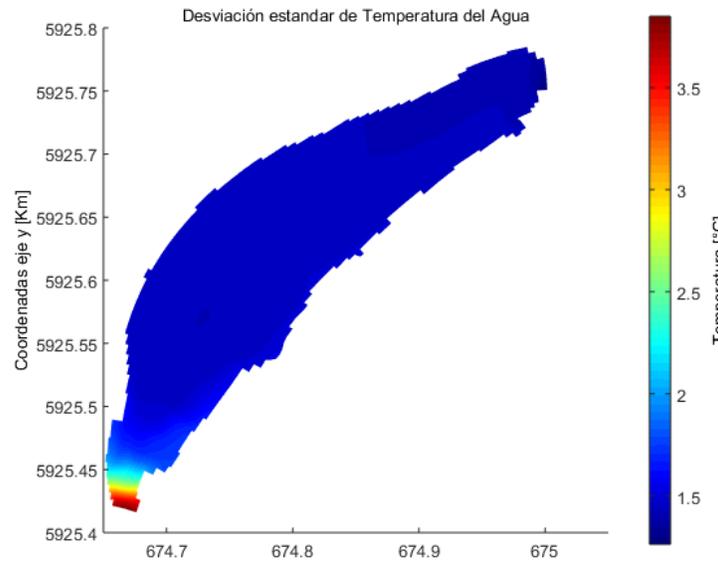


Figura 26. Desviación estándar de Temperatura del Agua.

Fuente: Elaboración Propia.

6.4. Patrones de Microcystis.

Microcystis

La *Microcystis* se evaluó a través de concentraciones de masa por volumen, este resultado es homologado al indicador de biomasa Clorofila- α y debido a la compatibilidad de los datos validados, todos los resultados fueron expresados en Clorofila- α . En la figura 27, se muestran concentraciones medias de Clorofila- α para el periodo de simulaciones de 1-Enero a 1-Abril. No se observan grandes

diferencias de concentraciones en los sectores laterales que poseen magnitudes de 115,5 [mg/L] promedio. Esto se debe a los patrones de mezcla resultantes, que favorecen la distribución homogénea de *Microcystis* tanto en las orillas como el centro del Lago, con velocidades de flujo relativamente bajas. La mayor concentración de biomasa puede observarse en la salida del cuerpo de agua, debido, esto puede deberse a la capacidad de respuesta tardía de drenaje del cuerpo de agua, que posee bajas velocidades de flujo, por lo tanto caudales de salida bajos, como se observó en la sección anterior.

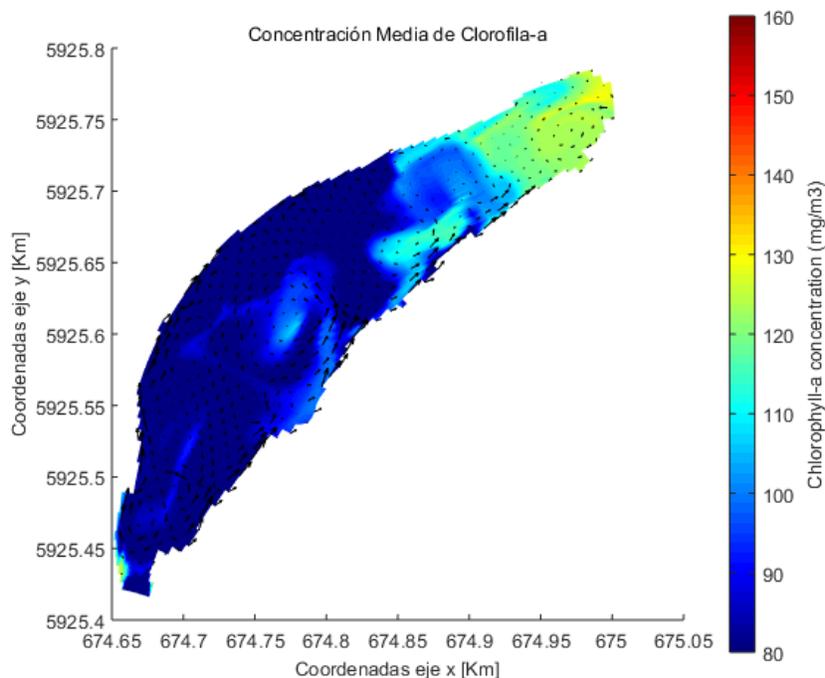


Figura 27. Promedio de simulaciones de Clorofila-a y sus vectores de velocidad correspondiente.

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa en la Tabla 20 que estadísticamente las concentraciones de *Microcystis*, poseen mayor proporcionalidad lineal con las variables PO₄, NO₃ y velocidad media de flujo, esto se debe a que a lo largo de la línea temporal del desarrollo de *Microcystis* necesita de las concentraciones de nutrientes para crecer, el consumo de estos refleja el aumento de la población de la microalga, explicando su valor negativo además, la mayor estabilidad de la columna de agua se encuentra cuando existe menor velocidad de flujo en el cuerpo, por lo tanto, esto también favorece al desarrollo de *Microcystis*, indicando nuevamente el signo negativo en el coeficiente de correlación en velocidad media de flujo.

Tabla 20. Coeficientes de correlación sobre el parámetro ingresados al modelo.

Velocidad del Viento [m/s]	Temperatura Ambiental [°C]	Precipitaciones [mm]	Radiación [W/m ²]	Humedad [%]
-0,26	0,14	-0,24	0,26	0,18

Fuente: Elaboración Propia.

Las variables ingresadas, Velocidad del viento, Temperatura ambiental, precipitaciones, radiación y humedad, no posee un coeficiente de correlación proporcional al desarrollo de *Microcystis*, esto se debe a que estas variables son vistas como variables indirectas dentro de las ecuaciones del modelo. En otras palabras, el modelo para reproducir las concentraciones calcula las concentraciones netas para el desarrollo disponible, en este caso las

concentraciones efectivas de nitrato, fosfato e irradiancia. Esto se justifica en las variables calculadas por el modelo, como Temperatura del agua, Velocidad de flujo, Concentración de Nitrato y Fosfato vistas en la Tabla 21.

Tabla 21. Coeficientes de correlación sobre el parámetro calculados del modelo.

Vel. Flujo [m/s]	PO4 [g/m3]	NO3 [g/m3]	T° del Agua [°C]
-0,34	-0,36	-0,40	0,45

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 21 se observa, que el desarrollo de *Microcystis* posee el coeficiente de correlación más alto para la variable Temperatura del agua, con un coeficiente de correlación positivo de 0,45, esto quiere decir que es directamente proporcional a los cambios de la microalga, a diferencia de las concentraciones de nutrientes y velocidad de flujo, que presentan un coeficiente de correlación negativo, por lo tanto, las variables anteriormente mencionadas, son inversamente proporcionales al desarrollo de *Microcystis*, lo cual tiene sentido si se observa a los nutrientes como un recurso limitado que mientras el alga crece consume los nutrientes (NO₃ y PO₄) además, según lo observado en la literatura, la cianobacteria tiene preferencia de desarrollarse en aguas con baja magnitud de velocidad de flujo, entonces mientras decrece la velocidad de flujo el alga se desarrolla positivamente. Las gráficas se encuentran en el Anexo 3.

Bloom de *Microcystis*

Las simulaciones arrojaron el pic más alto de concentraciones medias diarias de *Microcystis* en el mes de Marzo, con una magnitud media de 157 [mg/m³] de Clorofila- α , las concentraciones se mantuvieron con una desviación estándar de 23 [mg/m³] en Clorofila- α , a lo largo del punto central de la laguna Lo Galindo, anteriormente validado. Por lo tanto para la evaluación de bloom se consideró la fecha 20 de Marzo a 31 de Marzo. Estas concentraciones fueron analizadas bajo el supuesto que la mayor concentración de *Microcystis* representa una condición de bloom.

Las variables ingresadas que permitieron explicar de mejor forma la situación de bloom, fue en primer lugar velocidad de viento y temperatura ambiental, con un coeficiente de correlación de -0,58 y 0,53 respectivamente. La velocidad del viento influye directamente sobre los aportes de movimiento, debido a la condición negativa del coeficiente de correlación, se espera que mientras baja la velocidad del viento se favorezcan los episodios de bloom en el cuerpo de agua y por otro lado la temperatura ambiental de coeficiente de correlación positiva ayude a los mecanismos biológicos a acelerar sus procesos además, otras variables como radiación y humedad son las que menos explican la aparición de *Microcystis* en forma de bloom con valores de 0,14 y 0,03. Los resultados son expresados en la tabla 22.

Tabla 22. Coeficientes de correlación sobre el parámetro ingresados al modelo.

Velocidad del Viento [m/s]	Temperatura Ambiental [°C]	Precipitaciones [mm]	Radiación [W/m ²]	Humedad [%]
-0,58	0,53	-0,33	0,14	0,03

Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente las variables calculadas (Tabla 23) tuvieron valores igualmente satisfactorios, como velocidad del flujo y temperatura del agua, con valores de -0,63 y 0,88 respectivamente. De esto se desprende que la variable de temperatura del agua, es la variable que mejor se ajusta a la correlación del desarrollo de floración algal. Otras variables como PO₄ y NO₃, nutrientes, estadísticamente no explican la dinámica de las altas tasas de crecimiento, acercándose a valores más cercanos a cero (-0,10 y -0,28).

Tabla 23. Coeficientes de correlación sobre el parámetro calculados del modelo.

Vel. Flujo [m/s]	PO ₄ [g/m ³]	NO ₃ [g/m ³]	T° del Agua [°C]
-0,63	-0,10	-0,28	0,88

Fuente: Elaboración Propia.

7. CONCLUSIONES

- La Hipótesis se rechaza, debido a que la temperatura del agua no es concluyente para explicar las altas concentraciones de bloom por si sola.
- De esta investigación se puede obtener a través del modelo; Las concentraciones en el tiempo y en el espacio de *Microcystis* en el cuerpo de agua de la Laguna Lo Galindo además, de todas las caracterizaciones hidrodinámicas del cuerpo de agua.
- Finalmente, los parámetros que mejor explican la aparición de bloom o las más altas concentraciones de biomasa son las variables ingresadas de temperatura ambiental y velocidad del viento y de las variables calculadas temperatura del agua y velocidad de flujo.

Además se agregan distintos desafíos y proyecciones de esta investigación, como por ejemplo;

Incorporar mayor cantidad de datos.

Agregar mayor cantidad de datos de muestreo en los nutrientes de entrada, se podrían obtener las concentraciones de *Microcystis* y Clorofila-a, con mayor precisión.

Agregar perfiles de temperatura podría, generar además datos aproximados de perfiles transversales de las *Microcystis* en la columna de agua y así comprender fenómenos de floraciones tipo de espuma o superficiales.

Analizar zonas de concentración fitoplanctónicas.

Potenciales zonas de peligrosidad o con riesgos a la salud, por la toxicidad que presentan las floraciones algales.

Estudio de Cianotoxinas, realizar análisis tanto empírico como matemático/estadístico al análisis de concentraciones de *Microcystis* y las concentraciones de cianotoxinas presentes en el cuerpo de agua y en específico en las zonas de mayor concentración de esta microalga.

Zonas de muestreo, se plantean además posibles zonas de muestreos, para el análisis o búsqueda de concentraciones altas de *Microcystis* con el fin de posteriores muestreos para esta laguna.

Extender el estudio a otras lagunas o lagos de Chile

Se hace uso de una herramienta sofisticada que es capaz de calcular concentraciones de biomasa en diferentes condiciones ambientales y cuerpos de agua, además con una gran variedad de modelación de microalgas y/o competencias entre microalgas, que en su mayoría son productoras de floraciones algales. Chile posee gran presencia de cuerpos de agua lénticos que pueden ser representados y el posible impacto del desarrollo del fitoplancton en estos lugares.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Almanza, V. (2016). *Floraciones de fitoplancton en ambientes eutróficos: Dinámica y factores condicionantes en los lagos someros de Concepción, Chile Central*. Trabajo de grado, Doctorado en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales, Universidad de Concepción, Concepción.
- Arbat, M., Sánchez-Juny, M., Bladé, E., & Dolz, J. (2009). *Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2*. Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid, 1(9).
- Backer, L. (2002). *Cyanobacterial harmful algal blooms (CyanoHABs): Developing a public health response*. Lake and Reservoir Management, 18(1), 20-31.
- Bielecka, M. & Kazmierski, J. (2003). *A 3D mathematical model of Vistula Lagoon hydrodynamics-general assumptions and results of preliminary calculations*. Ground water, 80, 2-4.
- Blauw, A. N., Los, H. F., Bokhorst, M., & Erftemeijer, P. L. (2009). *GEM: a generic ecological model for estuaries and coastal waters*. Hydrobiologia, 618(1), 175-198.
- Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., Britos, A., Vidal, L. & Martínez de la Escalera, G. (2015). *Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay*. Innotec, (10 ene-dic), 9-22.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (1997). *Brock biology of microorganisms* (Vol. 11). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice hall.

- Brown, A. L., & Carpenter, R. C. (2013). *Water-flow mediated oxygen dynamics within massive Porites-algal turf interactions*. Marine Ecology Progress Series, 490, 1-10.

- Chen, Q., & Mynett, A. (2006). *Modelling algal blooms in the Dutch coastal waters by integrated numerical and fuzzy cellular automata approaches*. Ecological modelling, 199(1), 73-81.

- Burger, D., Hamilton, D., Pilditch, C., (2008). *Modelling the relative importance of internal and external nutrient loads on water column nutrient concentrations and phytoplankton biomass in a shallow polymictic lake*. Ecological modelling 211 (2008) 411–423.

- Chen, Y., Qin, B., Teubner, K. & Dokulil, M. (2003). *Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: Microcystis-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China*. Journal of Plankton Research, 25: 445-453.

- De León, L. (2002). *Floraciones de cianobacterias en aguas continentales del Uruguay: causas y consecuencias*. Perfil Ambiental del Uruguay, 28-37.

- Deus, R., Brito, D., Kenov, I., Lima, M., Costa, V., Medeiros, A., & Alves, C. (2013). *Three-dimensional model for analysis of spatial and temporal patterns of phytoplankton in Tucuruí reservoir, Pará, Brazil*. Ecological modelling, 253, 28-43.

- Dillon P., Rigler, F. (1974). *The Phosphorus-Chlorophyll Relationship in Lakes*. Limnology and Oceanography. 19, 5, 767-773.

- Escolar, L., Pérez-Martín, J., & De Lorenzo, V. (1999). *Opening the iron box: transcriptional metalloregulation by the Fur protein*. Journal of bacteriology, 181(20), 6223-6229.

- EULA. (2012). *Agua, situaciones de emergencia, factibilidad técnica para el abastecimiento de agua potable desde un sistema de lagunas urbanas*. PROYECTO 10CREC-8453. Proyecto INNOVA, Chile.

- Fabre, A., Carballo, C., Hernández, E., Piriz, P., Bergamino, L., Mello, L. & Bonilla, S. (2010). *El nitrógeno y la relación zona eufótica/zona de mezcla explican la presencia de cianobacterias en pequeños lagos subtropicales, artificiales de Uruguay*. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, 5(1), 112-125.

- Falvey, M., & Garreaud, R. (2009). *Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006)*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114(D4).

- FONIS. (2015). *Identificación, monitoreo y evaluación de riesgo de la población del gran Concepción ante la presencia de cianobacterias y cianotoxinas*. Informe final proyecto FONIS CONICYT SA 13I20211.

- Fontúrbel, F. (2005). *Physicochemical and biological indicators of the eutrophication process at Titikaka Lake, Bolivia*. Ecological Applications. v.4, n.1-2

- García, S. (2014). Cianobacterias y cianotoxinas, impactos sobre la salud humana. Obtenido de www.ataonline.org: http://www.ataonline.org.ar/bibliotecavirtual/documentos_utilies/Cianobacterias_y_Cianotoxinas.pdf, [2016, 11 de Octubre]

- Girão, E., De Andrade, E., de Freitas R., de Araújo, L. & Meireles, A. (2008). *Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal*. Revista Ciência Agronômica, 38(1), 17-24.

- Gómez, C., Pérez, B., Shen, G., Schluchter, W. & Bryant D. (2003). *Interaction of ferredoxin: NADP+ oxidoreductase with phycobilisomes and phycobilisome substructures of the cyanobacterium Synechococcus sp. strain PCC 7002*. Biochem 42: 13800-13811

- Gutiérrez, J. (2011). *Evaluación de la materia orgánica en el río frío soportada en el qual2k versión 2.07*. Dyna, 78(169), 131.

- Gyssels, P., Baldissoni, M., Hillman, G., Rodriguez, A., Bosc, J., Corral, M., Pagot, M., Brea, D., Spalletti, P., Farias, H. (2013). *Aplicaciones del modelo numérico Delft3D a diferentes problemas hidrosedimentológicos en casos argentinos*. Mecánica Computacional, Vol XXXII, págs. 2757-2777.

- Hauschild, A., Nelson, C. & Krotkov, G. (1962). *The effect of light quality on the products of photosynthesis in green and blue-green algae, and in photosynthetic bacteria*. Canadian Journal of Botany, 40(12), 1619-1630.

- Hallegraeff, G. (1992). *A review of harmful algal blooms and their apparent global increase*. Phycologia. 32(2): 79-99.

- Havens, K., James, T., East, T. & Smith, V. (2003). *N:P ratios, light limitation and cyanobacterial dominance in a sub-tropical lake impacted by non-point source nutrient pollution*. Environmental Pollution, 122: 379-390.

- He, G., Fang, H., Bai, S., Liu, X., Chen, M., & Bai, J. (2011). *Application of a three-dimensional eutrophication model for the Beijing Guanting Reservoir, China*. *Ecological Modelling*, 222(8), 1491-1501.

- Horne, A., Goldman, C. (1994) *Limnology* (2nd. ed.). California: McGraw-Hill

- Huisman, J., van Oostveen, P. & Weissing, F. (1999). *Species dynamics in phytoplankton blooms: incomplete mixing and competition for light*. *The American Naturalist*, 154: 46-48.

- Imai, H., Chang, K., Kusaba, M., & Nakano, S. (2009). *Temperature-dependent dominance of Microcystis (Cyanophyceae) species: M. aeruginosa and M. wesenbergii*. *Journal of Plankton Research*, 31: 171-178.

- Juárez, G., & Azcue, I. (2008). *Vigilancia sanitaria de cianobacterias en aguas de consumo humano y aguas de baño*. *Revista de Salud Ambiental*, 8(1), 1-7.

- Kim, S. C., Cerco, C. F., & Johnson, B. H. (2006). *Three-dimensional management model for Lake Washington, Part I: Introduction and hydrodynamic modeling*. *Lake and Reservoir Management*, 22(2), 103-114.

- Korhonen, L., Macías-Carranza, V., Abdala, R., Figueroa, F. & Cabello-Pasini, A. (2012). *Efecto de la concentración del sulfuro, pH y anoxia sobre la fotosíntesis y respiración de Zostera marina*. *Ciencias marinas*, 38(4), 625-633.

- Lesser, G., Roelvink, J., Van Kester, J., & Stelling, G. (2004). *Development and validation of a three-dimensional morphological model*. *Coastal engineering*, 51(8), 883-915.

- Lewis, Jr. W., Wurtsbaugh, W., & Paerl, H. (2011). *Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters*. Environmental science & technology, 45(24), 10300-10305.

- Loreto, C., Rosales, N., Bermúdez, J., & Morales, E. (2003). *Pigment and protein production of the cyanobacterium Anabaena PCC 7120 in relation to nitrogen concentration and irradiance*. Gayana. Botánica, 60(2), 83-89.

- Mardones, M., Vidal, C., (2001). *La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción*. EURE (Santiago), 27(81), 97-122.

- Marín, V. & Campuzano, F. (2008). *Un modelo Hidrodinámico-Barotrópico para fiordos australes entre Chile Los 41 S y los 46 S*. Ciencia y Tecnología del Mar, 31(2), 125-136.

- Medrano, E. A., Uittenbogaard, R. E., Pires, L. D., Van De Wiel, B. J. H., & Clercx, H. J. H. (2013). *Coupling hydrodynamics and buoyancy regulation in Microcystis aeruginosa for its vertical distribution in lakes*. Ecological modelling, 248, 41-56.

- Meehl, G., Stocker, T., Collins, W., Friedlingstein, P., Gaye, A, Gregory, J. & Raper, S. C. (2007). *Global climate projections*. Climate change, 3495, 747-845.

- Milutinović, A., Sedmark, B., Horvat-Žnidaršić, I., & Šuput, D. (2002). *Renal injuries induced by chronic intoxication with microcystins*. Cell Mol. Biol. Lett, 7(1), 139-141.

- MOP. (2001). Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Concepción, VIII Región. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

- Paerl, H. (1988). *Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters*. *Limnology and Oceanography*, 33(4part2), 823-843.

- Parra, O. (1989). *La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio*. *Ambiente y Desarrollo*, 1, 117-136.

- Parra, O. (2009). *Situación de los lagos de Concepción. Seminario Recuperemos los Lagos para los Habitantes de Concepción*. Concepción. EULA-CHILE. 2pp.

- Pérez, D., Soraci, A., & Tapia, M. (2008). *Cianobacterias y cianotoxinas: rol de las microcistinas en la salud humana y animal y su detección en muestras de agua*. *Analecta Veterinaria*, 28.

- Piñol, J., Terradas, J., y Lloret, F. (1998). *Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain*. *Climatic Change*, 38: 345-357.

- Moll, A., & Radach, G. (2003). *Review of three-dimensional ecological modelling related to the North Sea shelf system: Part 1: models and their results*. *Progress in Oceanography*, 57(2), 175-217.

- Ramos, J., & Redondo, A. (2007). *Cálculo del bombeo de Ekman a partir de datos del dispersómetro de viento seaWinds a bordo del satélite QuikSCAT*. *Revista de Teledetección. Número Especial*, pp 40-44.

- Reynolds, C. S. (1973). *Growth and buoyancy of Microcystis aeruginosa Kutz. emend. Elenkin in a shallow eutrophic lake*. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 184(1074), 29-50.

- Roldán G., & Ramírez J. (2008). *Fundamentos de limnología Neotropical* (2da. ed.). Colombia: Universidad de Antioquia.

- Rosso, L., & Giannuzzi, L. (2011). *Factores ambientales y antropogénicos que afectan la formación de floraciones de cianobacterias y cianotoxinas*. En: *Cianobacterias como determinantes de la salud*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Salud de la Nación.

- Rudolph-Böhner, S., Mierke, D., & Moroder, L. (1994). *Molecular structure of the cyanobacterial tumor-promoting microcystins*. FEBS letters, 349(3), 319-323.

- Sourisseau, S., Bassères, A., Périé, F., & Caquet, T. (2008). *Calibration, validation and sensitivity analysis of an ecosystem model applied to artificial streams*. Water research, 42(4), 1167-1181.

- Scasso, F., Mazzeo, N., Gorga, J., Kruk, C., Lacerot, G., Clemente, J., Fabian, D. & Bonilla, S. (2001). *Limnological changes in a sub-tropical shallow hypertrophic lake during its restoration: two years of a whole-lake experiment*. Aquatic Conservatio. Marine and Freshwater Ecosystems, 11: 31-44.

- Stanier, R. & Villanueva, J. (1996). *Microbiología* (2da ed.). Barcelona: Reverté,

- Vila, I. (2003). *Los sistemas acuáticos continentales, su ontogenia natural acelerada por efecto antrópico: La eutrofización y la salinización*. Tópicos Básicos y Estudios de Caso. 11-21.

- Vintila, S. & El-Shehawy, R. (2007). *Ammonium ions inhibit nitrogen fixation but do not affect heterocyst frequency in the bloom-forming cyanobacterium Nodularia spumigena strain AV1*. *Microbiology*, 153: 3704-3712.

9. ANEXOS

Anexo 1. Áreas de drenaje y Colectores de agua lluvia.

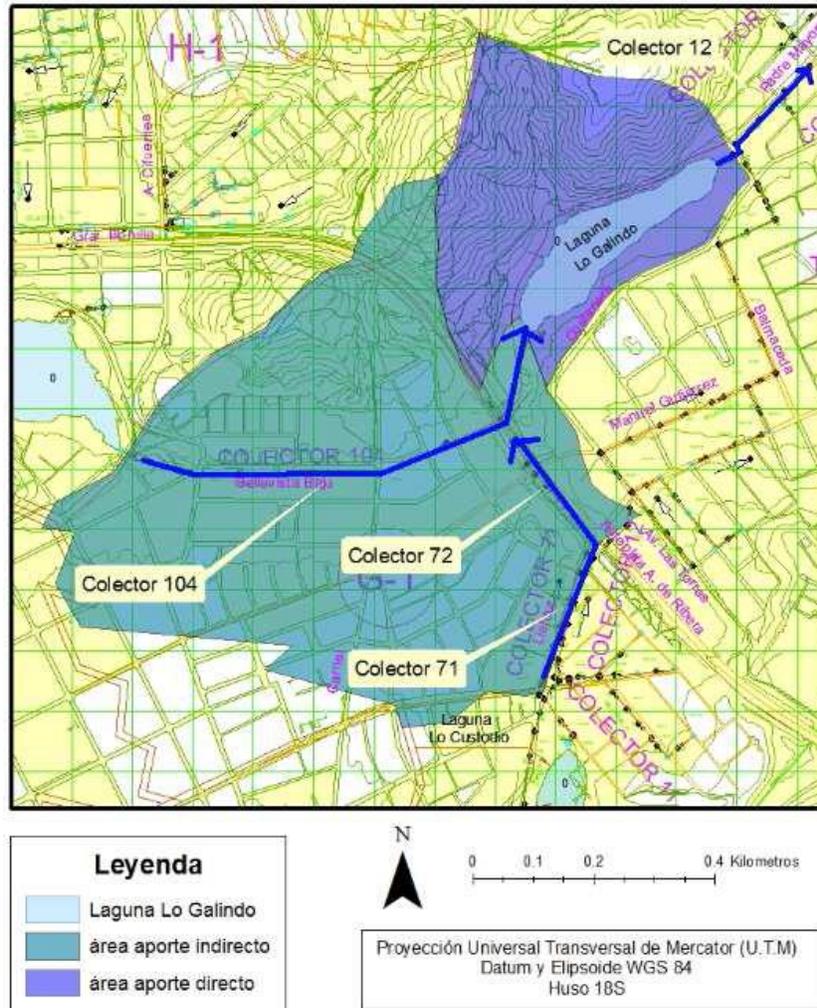


Figura 28. Área de drenaje y fuentes aportantes en la entrada y salida del lago.

Fuente: Eula (2012)

Anexo 2. Guía para elaboración de normas secundarias en lagos chilenos.

Tabla 24. Parámetros para determinar estados tróficos de los lagos chilenos.

Elementos o compuestos	Unidad	Estado ultraoligotrófico	Estado Oligotrófico	Estado mesotrófico
Clorofila a	µg/L	<1	3	10 (15)
DBO ₅	mg/L	<1	5	20
Fósforo	µg/L	< 5 (7,5)	10 (10)	20 (30)
Nitrógeno	µg/L	<60 (300)	250 (450)	400 (750)
Productividad primaria	mg C/m ² Año	<30	80	250
Transparencia (Disco Secchi)	m	>20 (12)	10 (6)	5 (3)

NOTA: Los valores señalados en esta tabla serán válidos para lagos araucanos y norpatagónicos. Para otros cuerpos lacustres los valores se expresan entre paréntesis no asignándose valores a todos los compuestos o elementos.

1= Expresado en términos de valor mínimo.

Anexo 3. Análisis gráfico de variables versus desarrollo de Microcystis

3.1 Análisis gráfico de variables ingresadas versus desarrollo de Microcystis

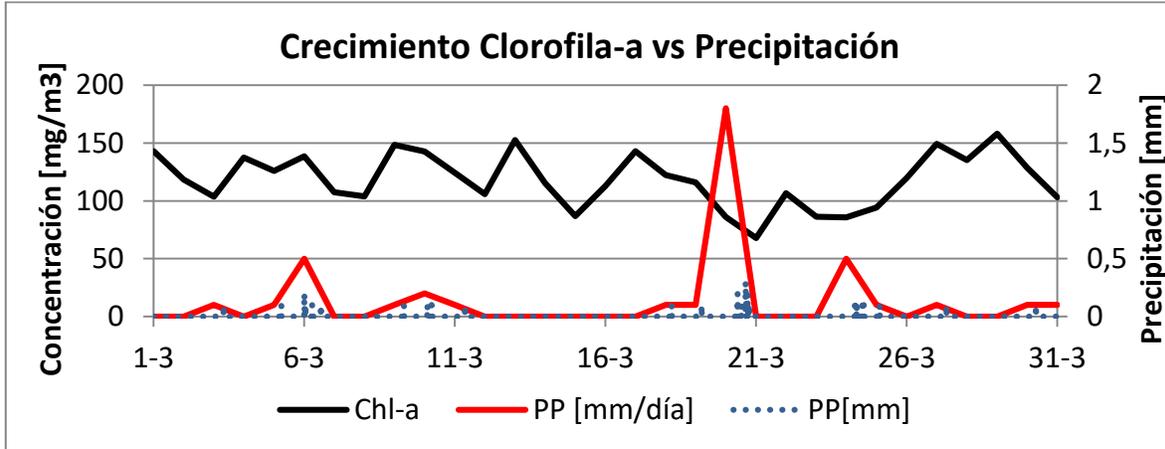


Figura 29. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Precipitación.

Fuente: Elaboración Propia

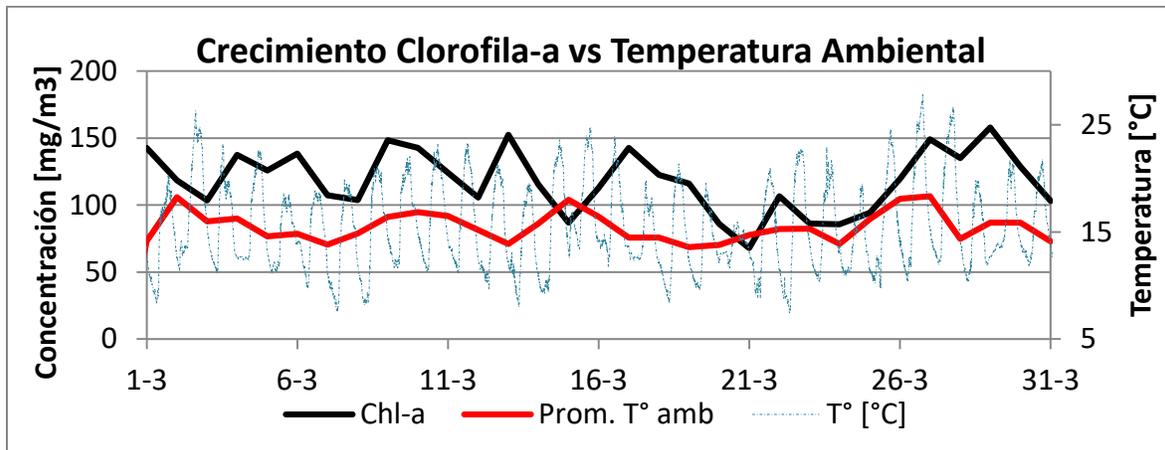


Figura 30. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs T° Ambiental.

Fuente: Elaboración Propia

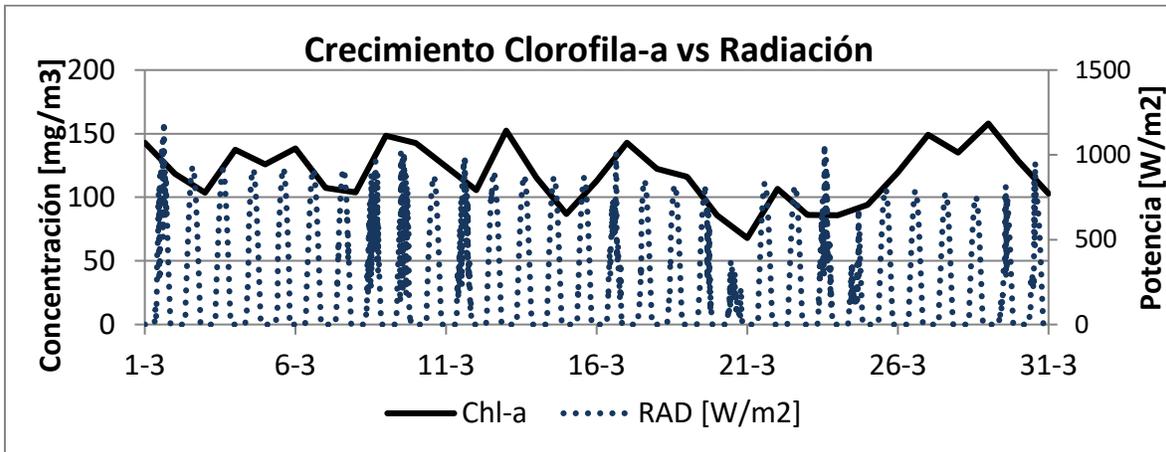


Figura 31. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Radiación.

Fuente: Elaboración Propia

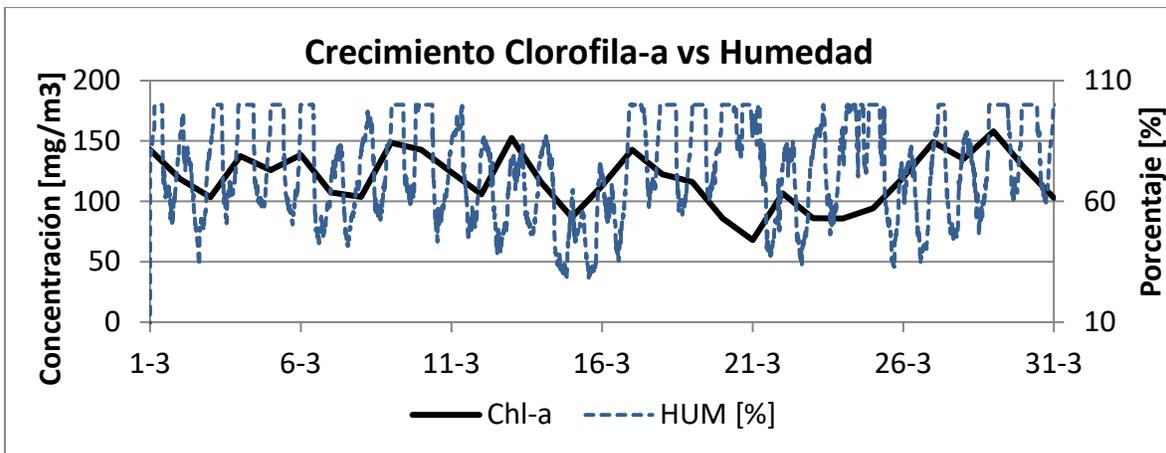


Figura 32. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs % de Humedad.

Fuente: Elaboración Propia

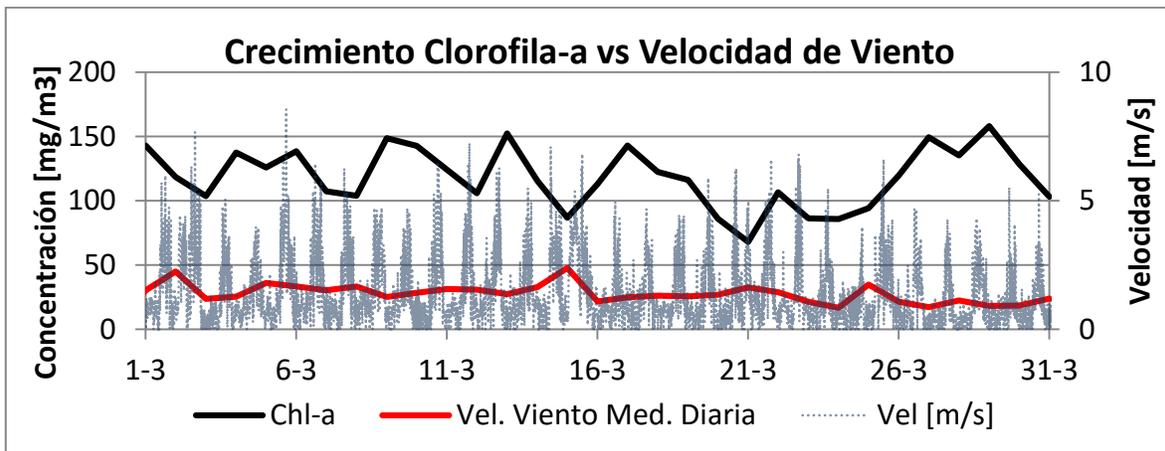


Figura 33. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Vel. de Viento.

Fuente: Elaboración Propia

3.2 Análisis gráfico de variables calculadas versus desarrollo de Microcystis

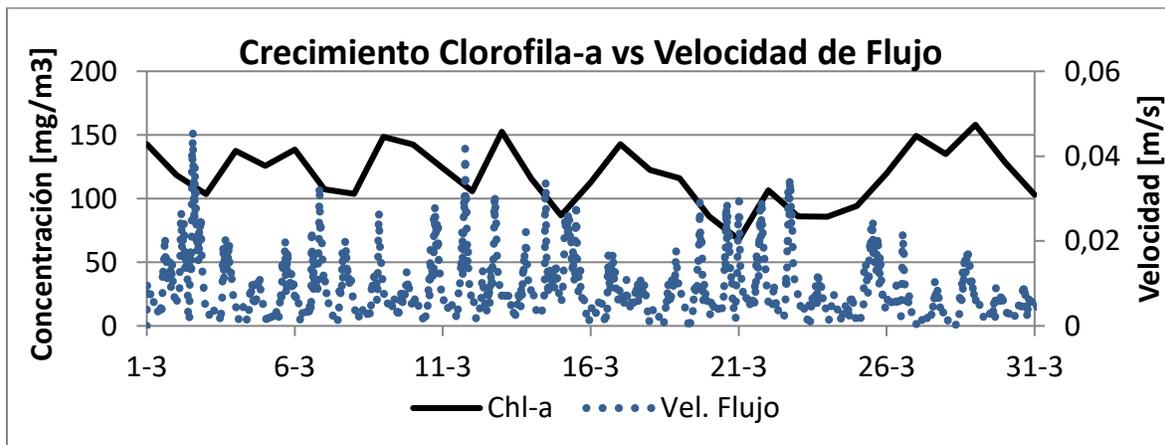


Figura 34. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Vel. de flujo.

Fuente: Elaboración Propia

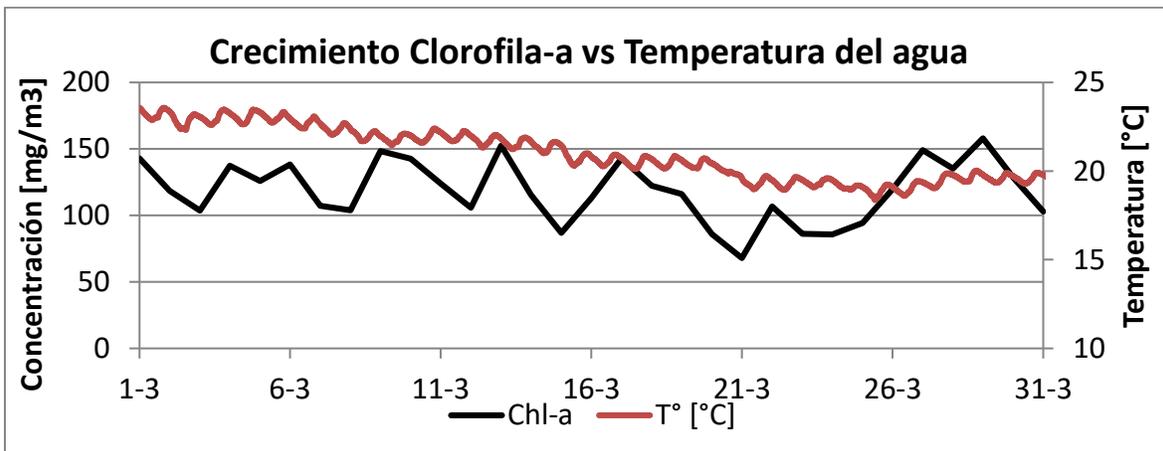


Figura 35. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs T° del agua.

Fuente: Elaboración Propia

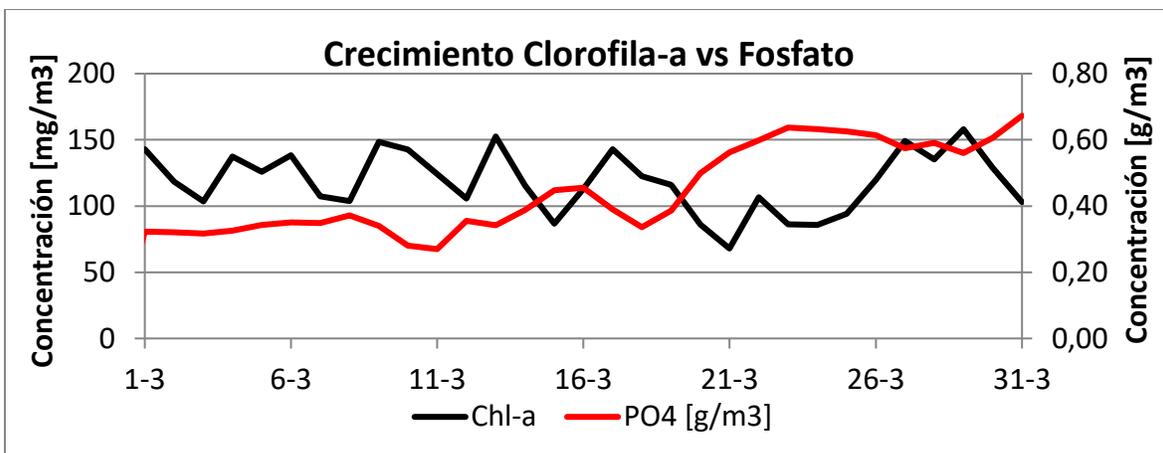


Figura 36. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Fosfato.

Fuente: Elaboración Propia

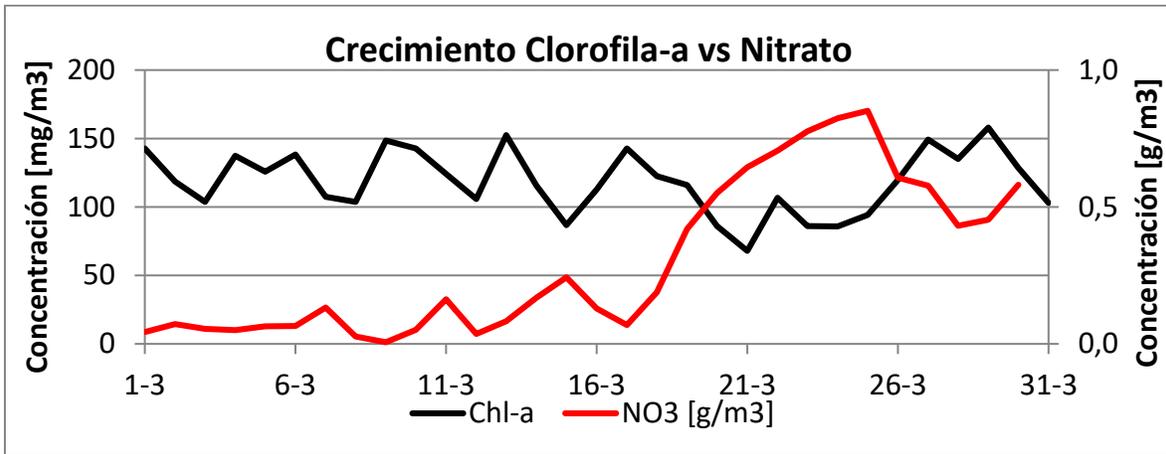


Figura 37. Crecimiento de Microcystis a través de Clorofila-a vs Nitrato.

Fuente: Elaboración Propia

