

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA**



**Biorremediación de cromo presente en aguas contaminadas del río  
Chillón – Lima por la microalga *Arthospira platensis* (Nordstedt)  
Gomont**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORES**

**Indira Simonett Pastor Carranza**

**Rooney Rosmery Hancco Luza**

**ASESORA**

**Elvira Teófila Castañeda Chirre**

**Lima, Perú**

**2021**

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 001 - 2022/UCSS/FIA/DI

Siendo las 08:30 a. m. del día 17 de noviembre de 2021 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- |                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| 1. Jorge Luis López Bulnes           | presidente      |
| 2. Fredy Román Paredes Aguirre       | primer miembro  |
| 3. Claudia Lilibiana Gutiérrez Rosas | segundo miembro |
| 4. Elvira Teófila Castañeda Chirre   | asesora         |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Biorremediación de cromo presente en aguas contaminadas del río Chillón-Lima por la microalga *Arthospira platensis* (Nordstedt) Gomont** que presentan las bachilleres en Ciencias Ambientales, **Indira Simonett Pastor Carranza y Rooney Rosmery Hancco Luza** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **MUY BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 17 de noviembre de 2021.



Jorge Luis López Bulnes  
PRESIDENTE



Fredy Román Paredes Aguirre  
1° MIEMBRO



Claudia Lilibiana Gutiérrez Rosas  
2° MIEMBRO



Elvira Teófila Castañeda Chirre  
ASESORA

## **DEDICATORIA**

A Doña Emily Ruth Luza Cuba, por todo lo vivido juntas.

“Sé que soy una mujer. Una mujer con fuerza interior y un montón de coraje”.

Annelies Marie Frank (1929-1945)

Rooney

## **DEDICATORIA**

A mi madre María Teresa Carranza Alva, pues sin ella no hubiera llegado hasta donde estoy.

“La voluntad encuentra el camino”.

Orison Swett Marden (1848-1924)

Simonett

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por ser mi compañero, guía y luz en este viaje a través de la vida.

A Indira Simonett Pastor Carranza, por su amistad, comprensión, paciencia y por recorrer junto a mí esta travesía llamada tesis; agradezco también a Mónica Guardamino, Oswaldo Lumbre, Julitte Puchuri y Jefferson Astete por su amistad, apoyo desinteresado durante la elaboración de este trabajo y palabras de aliento.

Agradezco de manera especial al Blgo. Armando Chiclla Salazar, por su amistad, consejos y por compartir sus conocimientos para la ejecución de esta tesis; de igual forma, a mi asesora Mag. Elvira Teófila Castañeda Chirre por guiarnos durante todo el proceso de realización del presente trabajo, puesto que sin ellos no hubiésemos podido culminar esta investigación.

Finalmente, agradecer a mis profesores, colegas y a todos los que hicieron posible superar esta etapa de mi vida profesional.

Atte. Rooney Hanco.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Rooney Rosmery Hanco Luza, por su amistad, dedicación y sobre todo su firmeza para recorrer este arduo proyecto pese a las dificultades; de igual manera, agradezco el apoyo de Mónica Guardamino, Oswaldo Lumbre, Julitte Puchuri y Jefferson Astete.

Agradezco a nuestra asesora Mag. Elvira Teófila Castañeda Chirre por orientarnos en los momentos que necesitamos de sus consejos en la ejecución de este proyecto; y de manera particular al Blgo. Armando Chiclla Salazar, quien con su conocimiento, experiencia y soporte logramos finalizar esta investigación.

Finalmente, agradecer a mi familia, colegas, profesores y a todos los que hicieron posible superar esta etapa de mi vida profesional.

Atte. Indira Pastor.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Índice general .....	VII
Índice de tablas .....	IX
Índice de figuras .....	X
Índice de apéndices.....	XII
Resumen .....	XIII
Abstract.....	XIV
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
1.1. Antecedentes .....	4
1.2. Bases teóricas especializadas .....	13
1.2.1. Biorremediación .....	13
1.2.2. Organismos biorremediadores.....	14
1.2.3. Mecanismos bioquímicos desarrollados por los microorganismos para el tratamiento de metales pesados .....	15
1.2.4. Microalga.....	15
1.2.5. <i>Arthrospira platensis</i> .....	16
1.2.6. Usos de la <i>Arthrospira platensis</i> .....	17
1.2.7. Cinética de crecimiento .....	19
1.2.8. Río Chillón .....	21
1.2.9. Contaminación de ríos en el mundo .....	23
1.2.10. Contaminación de agua con metales pesados.....	24
1.2.11. Metales pesados.....	24
<b>CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
2.1. Diseño de la Investigación .....	28
2.1.1. Lugar y fecha.....	28
2.1.2. Descripción del experimento.....	30
2.1.3. Tratamientos .....	40
2.1.4. Unidades experimentales.....	41
2.1.5. Identificación de las variables y su mensuración .....	42

2.1.6.	Diseño estadístico del experimento .....	47
2.1.7.	Análisis estadístico de datos .....	48
2.2.	Materiales .....	48
2.2.1.	Material biológico .....	48
2.2.2.	Medios de cultivo .....	48
2.2.3.	Reactivos .....	48
2.2.4.	Equipos .....	49
2.2.5.	Otros materiales.....	49
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS .....</b>		<b>50</b>
3.1.	Obtención de la biomasa inicial de <i>Arthrospira platensis</i> .....	50
3.2.	Determinación del efecto de la biomasa de la microalga <i>Arthrospira platensis</i> en el porcentaje de la remoción de cromo.....	52
3.3.	Caracterización fisicoquímica de las muestras de agua superficial provenientes del río Chillón antes y después del tratamiento con la microalga <i>Arthrospira platensis</i> .....	54
3.3.1.	Antes de los tratamientos con la microalga <i>Arthrospira platensis</i> .....	54
3.3.2.	Después de los tratamientos con la microalga <i>Arthrospira platensis</i> . .....	55
3.4.	Estimación del efecto de los periodos de exposición de la microalga <i>Arthrospira platensis</i> en el porcentaje de remoción de cromo presente en las muestras de agua de río Chillón .....	66
<b>CAPÍTULO IV: DISCUSIONES .....</b>		<b>67</b>
4.1.	Obtención de biomasa de <i>Arthrospira platensis</i> .....	67
4.2.	Efecto de la biomasa de <i>Arthrospira platensis</i> en el porcentaje de remoción de cromo .....	68
4.3.	Caracterización fisicoquímica de las muestras de agua antes y después del tratamiento con <i>Arthrospira platensis</i> .....	69
4.4.	Efecto de los periodos de exposición de <i>Arthrospira platensis</i> en el porcentaje de remoción de cromo presente en las muestras de agua .....	73
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....</b>		<b>75</b>
<b>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES .....</b>		<b>77</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>78</b>
<b>TERMINOLOGÍA .....</b>		<b>90</b>
<b>APÉNDICE .....</b>		<b>93</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación taxonómica de la especie Arthrospira platensis</i> .....	17
Tabla 2. <i>Tratamientos experimentales</i> .....	41
Tabla 3. <i>Variables y su mensuración</i> .....	42
Tabla 4. <i>Parámetros cinéticos de crecimiento de Arthrospira platensis</i> .....	51
Tabla 5. <i>Parámetros físico-químicos iniciales de la muestra de agua del río Chillón</i> .....	54
Tabla 6. <i>Valores de los parámetros obtenidos del análisis físico-químico de las muestras de agua del río Chillón tratadas con la microalga Arthrospira platensis (Nordstedt) Gomont a los 6 (T1, T2 Y T3) y 12 (T4, T5 Y T6) días de tratamiento.</i> .....	56
Tabla 7. <i>Variación de pH a los 6 y 12 en la aplicación de tratamientos</i> .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Estructura celular. a: fibrillas de DNA, donde pc: pared celular, t: sistema de membranas tilacoidales, y r: ribosomas. ....	16
<i>Figura 2.</i> Vista microscópica de la <i>Arthrospira platensis</i> .....	17
<i>Figura 3.</i> Delimitación de la cuenca del río Chillón. ....	22
<i>Figura 4.</i> Mapa de la localización del punto de muestreo de aguas estación Puente Chillón E-06 en cruce Panamericana Norte y río Chillón.....	29
<i>Figura 5.</i> Diagrama de flujo para la propagación de biomasa en condiciones de laboratorio. ....	31
<i>Figura 6.</i> Diagrama de flujo para la aplicación de tratamientos. .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<i>Figura 7.</i> a. Diseño estimado del fotobiorreactor madre. b. Diseño estimado de fotobiorreactores individuales. ....	34
<i>Figura 8.</i> a. Fotobiorreactor madre durante la propagación de biomasa. b. Aireador BIG-BOY B-10200. ....	34
<i>Figura 9.</i> a. Fotobiorreactores individuales en proceso. b. Fotobiorreactores individuales en proceso de aplicación de tratamientos. ....	35
<i>Figura 10.</i> Preparación del medio de cultivo y cargado del fotobiorreactor madre.....	36
<i>Figura 11.</i> Toma de muestras de agua. ....	39
<i>Figura 12.</i> Proceso de filtrado de la muestra de agua ....	39
<i>Figura 13.</i> a. Proceso de aplicación de tratamientos. b. Tratamientos.....	41
<i>Figura 14.</i> Proceso de determinación de Cromo Total, nitrógeno, fósforo y plomo. ....	45
<i>Figura 15.</i> Determinación de la OD y DBO <sub>5</sub> .....	47
<i>Figura 16.</i> Curva de crecimiento de biomasa de <i>Arthrospira platensis</i> fase exponencial .....	50
<i>Figura 17.</i> Concentraciones de clorofila final para cada tratamiento .....	52
<i>Figura 18.</i> Concentraciones de clorofila final contra remoción de cromo total para cada tratamiento.....	53
<i>Figura 19.</i> Variación de la conductividad a los 6 y 12 días. ....	59
<i>Figura 20.</i> Variación de la DBO <sub>5</sub> a los 6 y 12 días .....	62
<i>Figura 21.</i> Variación de la remoción de cromo total a los 6 y 12 días.....	63

<i>Figura 22. Variación fósforo total a los 6 y 12 días.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 23. Variación nitrógeno total a los 6 y 12 días .....</i>	<i>65</i>

## ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Cadena de Custodia Muestras de Agua del río Chillón .....	93
Apéndice 2. Manual de uso del pHotoFlex Turb para Nitrógeno .....	94
Apéndice 3. Manual de uso del pHotoFlex Turb para Fósforo .....	95
Apéndice 4. Manual de uso del pHotoFlex Turb para Cromo.....	96
Apéndice 5. Manual de uso del pHotoFlex Turb para Plomo .....	97
Apéndice 6. Curva de crecimiento de biomasa de Arthrospira platensis en 28 días .....	98
Apéndice 7. Valores de concentración de clorofila “a” en 28 días .....	99
Apéndice 8. Norma Legal.....	100
Apéndice 9. Análisis Estadístico ANOVA.....	101
Apéndice 10. Análisis Post Hoc para Conductividad.....	102
Apéndice 11. Análisis Post Hoc para Temperatura.....	103
Apéndice 12. Análisis Post Hoc para pH .....	104
Apéndice 13. Análisis Post Hoc para DBO <sub>5</sub> .....	105
Apéndice 14. Análisis Post Hoc para Cromo .....	106
Apéndice 15. Análisis Post Hoc para Fósforo.....	107
Apéndice 16. Análisis Post Hoc para Nitrógeno .....	108
Apéndice 17. Informe de Calibración del Multiparámetro (MULTI - 3430).....	109

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo la biorremediación de cromo presente en las aguas del río Chillón – Lima por la microalga *Arthrospira platensis*. Para ello, se inició con la colecta de muestras de agua contaminada con cromo del río Chillón y posteriormente fueron trasladados al laboratorio para su caracterización fisicoquímica (pH, conductividad, temperatura, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), nitrógeno total, fósforo y cromo totales). Luego, se elaboró el fotobiorreactor madre que sirvió para la obtención de la biomasa de *A. platensis*, posteriormente se elaboraron las unidades experimentales para la aplicación de los 6 tratamientos planteados (T1,T2,T3,T4,T5 y T6); mismos que estuvieron compuestos por un fotobiorreactor cerrado, a los cuales se les añadió 7 ml de *A. platensis*, 300 ml entre agua del río Chillón y agua desionizada cuyas proporciones fueron las siguientes: 100 % agua del río Chillón, 50 % de agua del río Chillón + 50 % de agua desionizada y 25 % agua del río Chillón + 75 % de agua desionizada para los 6 y 12 días de evaluación respectivamente.

La caracterización fisicoquímica antes de la aplicación de los tratamientos demostró la presencia de cromo total con un valor de 0,23 mg.L<sup>-1</sup> superando al ECA de agua categoría 4, norma que establece como valor máximo permitido hasta 0,011 mg.L<sup>-1</sup> de cromo total en un cuerpo receptor. Después de aplicados los tratamientos, los resultados más relevantes evidenciaron una reducción de hasta 88,04 % para T4, seguido de un 85,5 % y 84,05 % para T6 y T3 respectivamente. Se concluyó la eficacia para la remoción de cromo total de la *A. platensis* consiguiendo reducir la concentración de este metal pesado a valores por debajo de lo dictaminado por los Estándares de Calidad Ambiental para agua.

**Palabras Claves:** *Arthrospira platensis*, biomasa, cromo, remoción, fotobiorreactor, medio hidropónico.

## ABSTRACT

The aim of this research was the bioremediation of chromium present in the waters of the Chillón River - Lima by the microalga *Arthrospira platensis*. To this end, samples of water contaminated with chromium from the Chillón river were collected and then transferred to the laboratory for physicochemical characterisation (pH, conductivity, temperature, biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), total nitrogen, total phosphorus and total chromium). Afterwards, the mother photobioreactor was prepared for obtaining the biomass of *A. platensis*, after which the experimental units were prepared for the application of the 6 treatments proposed (T1, T2, T3, T4, T5 and T6), which were composed of a closed photobioreactor, to which 7 ml of *A. platensis*, 300 ml of water from the Chillón river and deionised water were added in the following proportions: 100 % Chillón river water, 50 % Chillón river water + 50 % deionised water and 25 % Chillón river water + 75 % deionised water for the 6 and 12 days of evaluation respectively.

The physicochemical characterisation before the application of the treatments showed the presence of total chromium with a value of 0,23 mg.L<sup>-1</sup> exceeding the ECA for category 4 water, a standard that establishes a maximum permitted value of 0.011 mg.L<sup>-1</sup> of total chromium in a receiving body. After applying the treatments, the most relevant results showed a reduction of up to 88,04 % for T4, followed by 85,5 % and 84,05 % for T6 and T3 respectively. The efficacy for the removal of total chromium from *A. platensis* was concluded, reducing the concentration of this heavy metal to values below those dictated by the Environmental Quality Standards for water.

Keywords: *Arthrospira platensis*, biomass, chromium, removal, photobioreactor, hydroponic medium.

## INTRODUCCIÓN

En el Perú se encuentra la cuenca hidrográfica del río Chillón situada en la parte central y occidental del país, en la región Lima, siendo considerada uno de los tres ríos (Lurín y Rímac), que soporta la mayor población urbana (Olarte, 2007). La cuenca baja del río Chillón es la que mayor problema presenta puesto que comprende 7 distritos de Lima: Carabaylo, Comas, Puente Piedra, Los Olivos, San Martín de Porres, Callao y Ventanilla; los principales usos de sus aguas son para consumo humano, agricultura y actividad industrial, al mismo tiempo a lo largo de su recorrido sirve como cuerpo receptor y medio de transporte para desechos domésticos, industriales y humanos (Reyes, 2012).

El problema más neurálgico de la cuenca baja del río Chillón es la contaminación de aguas por efluentes con metales pesados como: cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), cromo (Cr), níquel (Ni), generados durante los procesos productivos de las industrias (papeleras, textileras, curtiembres, etc.), minería (formal e informal) y agricultura (plaguicidas y fertilizantes) (Reyes, 2012). Uno de estos metales conocido por su alto nivel de toxicidad es el cromo, generalmente un elemento que se encuentra en rocas, animales, plantas y el suelo. Podemos encontrarlo en sus diferentes estados líquido, sólido o gas. El cromo,  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$  son las formas más comunes en las que hallamos este elemento. El  $\text{Cr}^{6+}$  y el cromo total son formas producidas en procesos industriales (curtiembres, galvanoplastia, etc.), a diferencia de las formas trivalentes ( $\text{Cr}^{3+}$ ) que prevalecen en organismos vivos (Agency for Toxic Substances and disease Registry [ATDRS], 2006). La alta toxicidad de este elemento también ha sido reportada en humanos con efectos que van desde alergias, erupciones cutáneas, dermatitis, problemas estomacales, infecciones respiratorias, sistema inmune amenorado, deterioro en los riñones e hígado, modificación del material genético, carcinoma broncogenético y muerte (Emsley, 2001; Wright, 2003).

Asimismo, el impacto ambiental generado por el uso de los metales pesados como lo es el cromo, ha llevado a la comunidad científica a desarrollar diversos métodos físico-químicos y biológicos para tratar las aguas residuales industriales contaminadas con estas sustancias. Dentro de los métodos físico-químicos está la recuperación por evaporación, tratamiento

electroquímico, oxido-reducción, entre otros; siendo estos métodos altamente costosos e ineficaces sobre todo en bajas concentraciones de metales. Además, la formación, disposición y almacenamientos de lodos, así como los residuos generados en estos procesos representan un nuevo problema por resolver (Malakootian *et al.*, 2016). Dentro de los métodos biológicos se encuentra la biorremediación (fitorremediación, micorremediación, etc.) realizada por organismos y microorganismos (algas, plantas, hongos, bacterias, etc.) capaces de remover, bioadsorber, bioacumular y que entre otras acciones logran que las moléculas tóxicas y altamente complejas se conviertan a moléculas menos complejas, no tóxicas que pueden ser utilizadas por otros organismos o de fácil eliminación; favoreciendo así la recuperación de aguas a un bajo costo (Chekroun *et al.*, 2014; Raja *et al.*, 2014).

La presente investigación fue ejecutada con el objetivo de evaluar la biorremediación de cromo presente en las aguas del río Chillón haciendo uso de la microalga *A. platensis*. Para el desarrollo fueron contempladas dos fases: la primera fase estuvo compuesta por la revisión literaria, alternativas de diseños metodológicos y pruebas preliminares, la segunda fase comprendió la parte experimental de la investigación que consistió en la producción de biomasa microalgal, elaboración de las unidades experimentales, procesamiento de datos recolectados y análisis de resultados.

Asimismo, *A. platensis* ha demostrado que es una opción de tratamiento biológico respetuoso con el medio ambiente debido a su capacidad de bioadsorber y biotransformar nutrientes, además de ser utilizada para la remoción de metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni) y zinc (Zn) como lo indicó Ahmad *et al.* (2010).



## OBJETIVOS

### Objetivo general

Evaluar la biorremediación de cromo presente en las aguas del río Chillón – Lima por la microalga *Arthrospira platensis* (Nordstedt) Gomont.

### Objetivos específicos

- Obtener la biomasa inicial de *A. platensis*.
- Determinar el efecto de la biomasa de la microalga *A. platensis* en el porcentaje de la remoción de cromo.
- Realizar la caracterización fisicoquímica (pH, conductividad, temperatura, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), nitrógeno total, fósforo total y cromo total) de las muestras de agua superficial provenientes del río Chillón antes y después del tratamiento con la microalga *A. platensis*.
- Estimar el efecto de los periodos de exposición de la microalga *A. platensis* en el porcentaje de remoción de cromo presente en las muestras de agua de río Chillón.

## CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes

#### Internacional

Robledo *et al.* (2020) en México realizaron un estudio con el objetivo de efectuar la evaluación y modelado predictivo de la condición de eliminación para la bioadsorción de colorante azul índigo empleando a la microalga *Spirulina platensis* como microorganismo absorbente. Los autores para lograr el objetivo del estudio valoraron la decoloración, pH óptimo, el efecto del tiempo, el efecto de la concentración y el efecto de la temperatura. La metodología inició con la incubación de 1 g.L<sup>-1</sup> de la microalga a diferentes pH con valores de 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 por triplicado en tubos con el fin de tasar las condiciones apropiadas de decoloración esto les permitió medir por densidad óptica la decoloración. El pH óptimo y la tasa de eliminación fueron establecidos preparando 12,5 ml de azul índigo con una concentración de 50 mg. L<sup>-1</sup>. Asimismo, para determinar cómo afecta el tiempo y la concentración prepararon azul índigo a concentraciones de 25, 50, 75 y 100 mg. L<sup>-1</sup> para luego ser sometidas a bioadsorción con *S. platensis* a pH óptimo. Finalmente, para evaluar el efecto de la temperatura sometieron los tubos con *S. platensis* y azul índigo a 30, 40 y 50 °C de temperatura. El análisis estadístico fue realizado en el programa R Foundation for Statistical Computing, Viena con una significancia del 95 %, empleando regresión lineal para isotermas. Los resultados obtenidos mostraron que la decoloración del colorante azul índigo se consiguió en 3 días con un 1 g.L<sup>-1</sup> de biomasa a un pH 4 siendo este último el pH óptimo hallado en las pruebas; demostrando de esta forma que la *S. platensis* fue apta para eliminar el tinte azul índigo. Sin embargo, estos resultados estuvieron sujetos a las condiciones del tratamiento y la temperatura fue uno de los parámetros decisivos. El estudio concluyó con la comparación de dos modelos teóricos de adsorción la primera una ecuación de modelo de primer orden y la segunda una ecuación de velocidad de segundo orden, esta comparación reveló una presión equivalente y correlación con los valores experimentales,

también trazaron las isothermas de adsorción observadas para las temperaturas del estudio 30, 40 y 50 °C, evidenciando una conducta bastante lineal en el rango medido. Las isothermas de equilibrio de absorción fueron estimadas describiendo preliminarmente la capacidad de eliminación de colorante por la *S. platensis*.

Barroso *et al.* (2019) en Colombia estudiaron la “Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *S. platensis* precipitación química y sedimentación primaria”. El objetivo fue comprobar a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos la remoción de cromo en aguas residuales determinando la alternativa de tratamiento de mayor potencial. La metodología experimental que aplicaron fue el tratamiento fisicoquímico y el tratamiento biológico, ambos de forma independiente. El tratamiento físico y químico para el análisis de la remoción de cromo empleó agua residual industrial (ARI) de una empresa metalmecánica en ocho reactores sometidos a dos tratamientos: las aguas residuales industriales para el tratamiento físico de sedimentación primaria (ARIS) y las aguas residuales industriales sedimentadas para el tratamiento químico (ARIT), añadiendo cal (CaO) en una proporción de 2,6 g. L<sup>-1</sup> para mantener el pH cercano al neutro entre 6 – 7. Seguidamente, usaron sulfato de aluminio Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> como agente coagulante realizándose una prueba de jarras con cinco distintas dosis del coagulante a 100 mg. L<sup>-1</sup>, 80 mg.L<sup>-1</sup>, 60 mg.L<sup>-1</sup>, 40 mg.L<sup>-1</sup> y 20 mg.L<sup>-1</sup> para encontrar la dosis óptima de sulfato de aluminio; la dosis de 20 mg.L<sup>-1</sup> presentó una mejor formación de floc biológico (masa biológica acumulada). El cromo total de cada una de las muestras fue establecido mediante digestión y absorción atómica de llama directa aire acetileno. Por otro lado, el tratamiento biológico utilizó aguas residuales industriales (ARI), aguas residuales sedimentadas (ARIS) y solución patrón (compuesta por K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> y enriquecida con medio de cultivo Zarrouk) a una concentración de 41 mg. L<sup>-1</sup> en la biomasa viva y muerta para evaluar la capacidad de biosorción de la *S. platensis* (*Arthrospira platensis*); todo ello lo realizaron en seis biorreactores tipo Batch en un periodo de 24 y 96 horas. Los resultados mostraron que: el tratamiento químico disminuyó el cromo a valores menores de 0.1 mg. L<sup>-1</sup> y logró una remoción de 99 %, pero la generación de lodos fue mayor al 30 % lo que evita la separación del metal. Mientras que, el tratamiento biológico de biomasa microalgal en las primeras 24 horas tuvo una tasa de remociones de hasta el 96,5 % y un valor final de cromo de 1,02 mg. L<sup>-1</sup>, además, permitió la recuperación de cromo para su posterior uso, este método también redujo los lodos a un 10 %. Los autores concluyeron que la remoción de

romo mediante la incorporación de un tratamiento físico-biológico resultó ser eficiente ya que mejora la sostenibilidad del proceso, por lo cual, este estudio recomendó su uso.

Villota *et al.* (2018) investigaron el tratamiento biológico *ex situ* de la laguna de Ubaque situada en Cundimarca, Colombia a través de la biorremediación con cepas de microalgas *Spirulina máxima* (Sm), *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) (Sp) y *Chlorella vulgaris* (Cv). El objetivo fue disminuir los niveles de nitratos, nitritos y fosfatos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) de la laguna y poder comprobar la capacidad depuradora de estas microalgas. El diseño de la investigación fue de tipo factorial. La metodología inició con la caracterización del agua para obtener el nivel de nutrientes, luego llevaron a cabo el cultivo de cepas a nivel de laboratorio en tres fotobiorreactores abiertos de 10 L con medio de cultivo Zarrouk a 20 °C y luz natural en fotoperiodos 12 h luz/12 h oscuridad, seguidamente probaron la adaptación de las tres cepas de microalgas a condiciones de la laguna durante una semana, los parámetros observados fueron: temperatura media del agua (20,5 °C), pH (7,3), condiciones climatológicas, temperatura media (17 °C) y humedad relativa (80 %). Por último, aplicaron el diseño experimental “compuesto central factorial 2<sup>2</sup>” ejecutado con el programa design-expert con las cepas, para comprobar la eficacia biorremediadora de las mismas. Los resultados obtenidos mostraron los siguientes valores: 88,24 % Cv, 85,9 % Sm y 64 % Sp para la remoción de nitratos; 87,2 % Cv, 82 % Sm y 82 % Sp para la remoción de nitritos, en cuanto a la remoción de fosfatos la Cv y la Sm superaron el 90 %, mientras que la Sp removió 84 %. Los investigadores concluyeron que la cepa de *Chlorella vulgaris* (Cv) fue la que mejores resultados manifestó en este proyecto, dado que reveló una mayor capacidad de adaptación a las condiciones de la laguna y una remoción mayor de nutrientes, por ende, el empleo de las microalgas es una alternativa viable para la biorremediación de procesos de eutrofización.

Maza *et al.* (2017) en Venezuela, analizaron la creación de pigmentos de *Arthrospira máxima* cultivada en fotobiorreactores. El objetivo fue evaluar la producción de pigmentos procedentes de la microalga cultivada en dos tipos de fotobiorreactores. La metodología que usaron fue el diseño de cultivo tipo Batch discontinuo en un ambiente controlado, con medio de cultivo Zarrouk en fotobiorreactores cilíndricos y helicoidales, durante 30 días. Los pigmentos fueron determinados durante las fases de crecimiento exponencial y estacionaria.

Para ello, usaron el método de extracción con acetona al 90 % y la cromatografía líquida de alta eficiencia sobre la biomasa algal para los pigmentos liposolubles y para los pigmentos ficobiliproteínicos probaron cuatro métodos: el primero llamado regulador de fosfatos/enzimas, la solución alcalina como segundo método previo tratamiento con  $\text{CaCl}_2$ , el buffer de fosfato como tercer método previo tratamiento con hielo seco y el último agua a 4 °C y posterior determinación por Espectrofotometría UV-Visible. El análisis estadístico fue realizado a través de ANOVA con un porcentaje de significancia del 95 % y utilizaron el programa Estadístico Statgraphics plus 4,1. Los resultados revelaron que los mayores valores de pigmentos liposolubles fueron obtenidos en los cultivos de los fotobiorreactores helicoidales en fase exponencial (clorofila a  $11,08 \pm 0,006 \mu\text{g. ml}^{-1}$ ;  $\beta$ -caroteno  $1,82 \pm 0,003 \mu\text{g. ml}^{-1}$ ; zeaxantina  $0,72 \pm 0,002 \mu\text{g. ml}^{-1}$ ); por otro lado, los pigmentos ficobiliproteínicos mostraron mayor contenido de pigmento en los cultivos de los fotobiorreactores cilíndricos en fase estacionaria que empleó el método de buffer de fosfato tratado con hielo seco para la extracción. La ficocianina encontrada dentro de las ficobiliproteínas estuvo presente en mayor proporción ( $\text{FC} = 77,74 \pm 0,767 \text{ mg. L}^{-1}$ ), así como la aloficocianina y ficoeritrina. La investigación concluyó que la biomasa de *A. máxima* presentó un potencial biotecnológico debido a su alto contenido de pigmentos.

Dal Magro *et al.* (2012) evaluaron en Brasil la “Biosorción de  $\text{Cr}^{6+}$  y eliminación de la DBO por *Spirulina platensis* a partir de un medio de cultivo suplementado con aguas residuales”. El objetivo fue la evaluación de la concentración ideal de aguas residuales que contienen cromo requerida para la eliminación máxima  $\text{Cr}^{6+}$  y DQO del medio utilizando la microalga. El diseño de la investigación fue de tipo Factorial Multinivel. La metodología consistió en usar cepas Paracas y Leb-52 de la microalga *Spirulina platensis*, el experimento fue desarrollado en matraces Erlenmeyer de 2 L con un volumen inicial de 1,8 L y una concentración inicial de inóculo de la biomasa de  $0,15 \text{ g. L}^{-1}$  en un horno controlado por termostato a 30 °C, un fotoperíodo de 12 h, iluminación de 1800 lux y con aireación constante. Las concentraciones iniciales de agua residual fueron de 0 %, 12,5 %, 25 % y 50 %, que fueron cultivadas en medio Zarrouk diluido al 50 % en condiciones controladas de aire, temperatura e iluminación durante un periodo de 28 días. Las variables estudiadas en este periodo fueron: el pH, el crecimiento de biomasa, la DQO y el  $\text{Cr}^{6+}$ . Los resultados evidenciaron que la cepa Leb-52 eliminó hasta un 42 % de  $\text{Cr}^{6+}$  de los medios de cultivo con un 50 % de aguas residuales que contenían  $23,40 \text{ mg.L}^{-1}$  de  $\text{Cr}^{6+}$  y la eliminación de

DQO para este caso estuvo próximo al 75 % en un periodo de 14 días. De igual manera, percibieron que la concentración de aguas residuales influyó en el crecimiento de microalgas sobre todo a altas concentraciones. Los autores concluyeron para este ensayo una eliminación de 82,19 % de DQO y 60,92 % de Cr<sup>6+</sup>, siendo la eliminación de DQO mayor que la eliminación de Cr<sup>6+</sup> en ambas cepas de *S. platensis*.

Mezzomo *et al.* (2010) estudiaron en río Grande Do Sul en Brasil el “Cultivo de la microalga *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) en aguas residuales porcinas”. El objetivo fue la probar la adaptación de la microalga y al mismo tiempo la proporción óptima de disolución de las aguas residual para maximizar la producción de biomasa, la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO), fósforo y amoníaco. La metodología fue de tipo experimental para lo cual emplearon la microalga *S. platensis* cepa paracas, cultivada en medio Zarrouk para su propagación y en el caso de las corridas utilizaron agua residual porcina estas últimas fueron realizadas en matraces Erlenmeyer de 2 L que contenían 1,8 L de medio y 5000 células. mL<sup>-1</sup> de biomasa, los matraces tuvieron que ser adaptados con un tapón a través del cual colocaron dos tubos (uno para aireación continua y el otro para recolección de muestras). Todos los cultivos fueron mezclados, aireados con aire filtrado y humidificado a un flujo de 20 L.h<sup>-1</sup> generado por bombas de diafragma y un sistema que le permitía eliminar las gotas de aceite, además estuvieron a 30 °C en un invernadero con iluminación de fluorescentes de 20 W con iluminancia de 2 000 Klux y un fotoperiodo de 12 h durante 30 días. La toma de muestras fue realizada a intervalos de 24 h y la concentración de biomasa fue determinada con el recuento de células microscópicas en la cámara Sedgewick Rafter Cell f50, establecieron el pH potenciométricamente todos los días. Los diseños estadísticos empleados fueron dos: Diseño Compuesto Central y Diseño de Ejecución Factorial. Los resultados evidenciaron que la cepa paracas de *S. platensis* mostró tasas máximas de crecimiento específico (204,6 células.mL<sup>-1</sup>), concentraciones celulares máximas (0,4 d<sup>-1</sup>) y la máxima remoción de fósforo (41,6 %) a menores concentraciones de agua residual de 5,0 y 8,5 %; y para el medio de cultivo con mayor concentración de aguas residuales agregadas (26,5 y 30,0 %) evidenció mayor tasa de remoción de DQO con porcentajes de 84,3 % y 79,3 %, que se encuentra estrechamente relacionado con el crecimiento de la microalga. Los autores concluyeron que *la S. platensis* demostró la capacidad de producción de biomasa, eliminación de fósforo y DQO en aguas residuales porcinas, por ende, puede ser empleada

como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales de cultivo porcino y así reducir el impacto generado por sus contaminantes.

## **Nacional**

Moscoso (2019) realizó un estudio de biorremediación de aguas residuales de curtiembre usando las especies de microalgas *Arthrospira platensis* y *Acutodesmus dimorphus* (Turpin). El objetivo del estudio consistió en evaluar la capacidad de biorremoción de las microalgas *A. platensis* y *A. dimorphus*. La metodología inició con la recolección de aguas servidas que fueron obtenidas de una curtiembre situada en el Parque Industrial de Río Seco, del departamento de Arequipa - Perú; misma que realiza sus descargas de efluentes sin tratamiento previo. Para el desarrollo de la parte experimental el filtrado de la muestra compuesta de agua residual fue realizado con un lecho de arena-grava, seguidamente durante 15 días en un fotobiorreactor fue ejecutado el tratamiento de biorremediación inoculándose el agua servida con las microalgas *A. platensis* y *A. dimorphus* por separado, también fue analizada la variación del pH, crecimiento de las dos especies de microalgas y la reducción de concentraciones de la demanda bioquímica en cinco días (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO) y cromo total. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: las dos especies de microalgas evidenciaron crecimiento en el agua residual, el pH tuvo valores superiores a 7,5. La especie *A. dimorphus* consiguió valores de remoción de 41 % de DBO<sub>5</sub>, de DQO 39 %, 75 % de Cr total. Por lo tanto, el análisis estadístico reveló que *A. platensis* alcanzó a remover gran cantidad de DBO<sub>5</sub> y DQO y *A. dimorphus* redujo elevada cantidad de Cr. Las microalgas entre el día 7 y 15 no presentaron diferencia estadística en las concentraciones de los parámetros de DBO<sub>5</sub> y cromo total; la diferencia solo fue para DQO. El autor concluyó que las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, DQO y cromo total no lograron reducirse hasta los límites máximos permisibles (LMP) al igual que a los valores máximos admisibles (VMA), siendo la *A. dimorphus* quien logró reducir la concentración de cromo total a valores inferiores al LMP. La disminución de DBO<sub>5</sub> y DQO posiblemente ocurrió debido a que ambas microalgas utilizaron la materia orgánica disuelta del agua servida como nutrientes a través de un metabolismo mixotrófico y heterotrófico. Asimismo, la eliminación del cromo total pudo deberse a la interacción con los grupos funcionales existentes en las superficies celulares de las microalgas y su absorción en el interior.

Sánchez (2018), ejecutó un estudio con el objetivo de evaluar el diseño de un fotobiorreactor (FBR) que utiliza iluminación fotovoltaica para la producción de biomasa de *A. platensis*, usando agua residual hidropónica. La metodología establecida fue de tipo experimental con una duración de 60 días, para su desarrollo aplicó tres tratamientos con sus réplicas respectivas y el control. El diseño estadístico empleado fue un Diseño Completo al Azar (DCA). El tratamiento T1 estuvo compuesto por un FBR con iluminación a través de un panel solar y Zarrouk como medio de cultivo; el tratamiento T2 fue compuesto por un FBR con iluminación a través de un panel solar y agua hidropónica residual como medio de cultivo; el tratamiento T3 constó con un FBR con iluminación de fluorescentes y agua hidropónica residual como medio de cultivo y, por último, el control tuvo un FBR con iluminación de fluorescentes y Zarrouk como medio de cultivo. Para cada uno de los tratamientos fue inoculada 150 ml de la especie *A. platensis* UTEX 1926. La tasa de crecimiento ( $\mu$ ) de la microalga, el tiempo de duplicidad (td), la generación de biomasa, la capacidad de carga (k), el pH, el porcentaje de proteína, temperatura y crecimiento poblacional de *A. platensis* fueron los parámetros analizados. En el análisis estadístico consideró la correlación de Pearson y ANOVA, para ello usó el software SPSS. Los resultados logrados revelaron que *A. platensis* presentó una elevada producción de biomasa ( $1,353 \pm 0,004 \text{ mg.L}^{-1}$ ) ( $p < 0,001$ ) y un porcentaje de proteína (33,75 %) para T2. Asimismo, para T2 la tasa máxima de crecimiento hallada de alta significancia ( $P = 0,000$ ) fue de  $\mu = 0,3744 \pm 0,005 \text{ días}^{-1}$  y una capacidad de carga  $k = 1,353 \pm 0,004 \text{ mg.L}^{-1}$ . De igual manera, la producción alcanzada fue de 530,2 mg de proteína por cada S/. 1,11 de dinero invertido, logrando tener un costo de producción menor en T2. En relación con los parámetros fisicoquímicos estudiados, la temperatura mostró una significativa correlación respecto al pH ( $r = 0,915$ ;  $P = 0,000$ ). El autor concluyó que usando el diseño de FBR con iluminación fotovoltaica y empleando agua residual hidropónica como medio de cultivo se generó una mayor producción de biomasa de *A. platensis*, siendo una alternativa viable para el crecimiento de la microalga.

Vásquez-Villaloboz *et al.* (2017) investigaron en la Universidad Privada de Antenor de Orrego de Trujillo, Perú con el objetivo de optimizar la producción de biomasa ( $\phi$ ) de cultivos batch de *Spirulina sp.* (*Arthrospira platensis*) en fotobiorreactores a escala de laboratorio (FBL). La metodología empezó con el cultivo de la microalga en medio Zarrouk con iluminación de 5,0 Klux y para los cultivos experimentales trabajaron con ( $\text{g.L}^{-1}$ ): 0,07



$K_2HPO_4$ , 0.005  $FeSO_4$ , 0.1  $NaNO_3$ , 0.1  $KNO_3$ , 1.6  $NaHCO_3$ , 330  $ml.L^{-1}$  de agua de mar filtrada para obtener 1,2 % de salinidad. El diseño de los fotobiorreactores de laboratorio (FBL) fueron de dos tipos: el primero, fotobiorreactor de canal bucle cerrado abierto a la atmosfera (FB-BCAA) de vidrio de 0,2 L de capacidad y el segundo fotobiorreactor de PVC (policloruro de vinilo) de 2,5 L de capacidad máxima con área de iluminación de 867,6  $cm^2$  construido de tubería PVC de 2" de diámetro y para la iluminación de los cultivos emplearon LED's de color blanco de 6500 Klux, 12 W, 220 V. El recuento de células fue hecho con un microscopio óptico 40X Leica con una cámara Neubauer (1/10 mm Deep, brighth line-Boeco, Germany); la inyección de aire al FB-BCAA estuvo dada por un soplador de aire de 0,24 kW, 0,32 HP, 3 330 por min y determinaron el pH con un pHmetro. Durante el estudio los investigadores analizaron las características hidráulicas y el valor de biomasa ( $\phi$ ) de un cultivo batch de *Spirulina sp.* en un FB-BCAA por efecto de la iluminación LED de  $8,3 \pm 1,9$  Klux y fotoperiodos de 12/12 y 24/0 h luz/oscuridad (L/O). Los resultados tras el desarrollo experimental indicaron que dentro de los FBL existieron dos zonas optimas de  $\phi$ , ambas zonas con una intensidad LED de 21,5 Klux y fotoperiodos de 12/12 y 24/0 h L/O con valores  $\phi$  de 1,65 y 1,62 correspondientemente. Asimismo, el modelo matemático que mostró estas zonas fue de segundo orden ( $p = 0,000396 < 0,05$ ) con una estabilidad de predicción de  $R^2 = 0,92$ . Por otra parte, en el FB-BCAA, el cultivo de *Spirulina sp.* con fotoperiodo de 12/12 h L/O, expuso un valor de  $\phi$  de 0,72, una adaptación ( $\lambda$ ) más rápida de 4,62 h, mayor velocidad específica de crecimiento de  $\mu_{max} = 0,033 h^{-1}$  y con menor tiempo de consumo de energía de 74,05 h, en comparación al cultivo desarrollado con fotoperiodo 24/0 h L/O. El FB- BCAA tuvo los siguientes parámetros hidráulicos: volumen de operación 2,5 L, velocidad de flujo 0,26  $m. s^{-1}$ , Froude (Fr) 0,60, Vedernikov (Ved) 0,90 y número de Reynolds (Re) 15 488. Los autores concluyeron que la *Spirulina* cultivada en un FB-BCAA con iluminación LED de  $8,3 \pm 1,9$  Klux y con un fotoperiodo de 12/12 h L/O obtuvo mejor producción de biomasa en comparación con el FBL con fotoperiodo 24/0 L/O.

Huarachi *et al.* (2015a) estudiaron en Perú, la adaptabilidad del alga *Cyanophyta Spirulina (Arthrospira) platensis* (Geitl) cultivada en fotobiorreactor tubular cónico en condiciones ambientales. El objetivo fue probar el efecto que tiene la radiación solar sobre la *S. platensis*. La metodología aplicada fue de tipo experimental iniciando con la elaboración de un fotobiorreactor tubular cónico de 0,28  $m^2$  en la superficie superior del cono (altura 0,7 m por diámetro superior 0,6 m), la construcción del sistema para el cultivo la realizaron con tubo

de PVC (Policloruro de Vinilo) transparente (diámetro 12 mm, longitud 34 m, 34 anillos utilizados para formar un cono y 7 m de longitud para el enfriador), el cual reforzaron con una estructura metálica y revestido de aluminio (volumen total = 5,3 L). La superficie interna del cono (0,71 m<sup>2</sup>) desde el 24 de junio al 12 de julio de 2013, estuvo expuesta a luz solar con una iluminancia de 11,700 lux y radiación solar media igual a 774 W. m<sup>-2</sup>. Para la agitación y aireación del cultivo en el fotobiorreactor emplearon una bomba de aire a un caudal medio de 0,002 L. s<sup>-1</sup>. Los resultados tras el estudio evidenciaron que la tasa de producción de biomasa seca fue de 0,298 g.m<sup>-2</sup>. día<sup>-1</sup>, el valor de clorofila "a" fue de 0,0023 g.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup> y el de carotenoides de 0,0011 g.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup>. El crecimiento de *S. platensis* estuvo sujeta a un modelo matemático de crecimiento "Potencial" en 18 días, el modelo se ajustó con estadísticos de (R<sup>2</sup>=0,937; F = 119,216). Los investigadores concluyeron que la radiación ultravioleta tuvo un impacto negativo en el rendimiento de la biomasa cosechada y su calidad. Asimismo, una elevada radiación UV, podría alterar el desarrollo morfológico de las cianobacterias afectando las tasas metabólicas y niveles tróficos más altos, ya que los ecosistemas acuáticos dependen en alta medida de estos parámetros.

Huarachi *et al.* (2015b) efectuaron un estudio en Perú, en base al cultivo de la microalga *A. platensis* con el objetivo de observar la productividad de biomasa cultivada en un fotobiorreactor a condiciones ambientales aprovechando la radiación solar de la región Arequipa - Perú como fuente energética. La metodología estuvo compuesta por un sistema con tres partes: la primera la construcción del fotobiorreactor de 4,0 m de largo doblemente curvado de policloruro de vinilo (PVC) transparente, la segunda un desgasificador de 4,0 L y la tercera una bomba de aire dispensadora de aire continuo. Por otro lado, el inóculo de *A. platensis* fue conservado usando como medio de cultivo la solución hidropónica La Molina al 25 % con un pH de 9; la determinación de biomasa fue realizada por el contenido de clorofila "a" utilizando la densidad óptica medida por espectrofotometría, así mismo la otra variable comprobable fue la radiación solar calculada con un radiómetro UV solar. El análisis de datos se realizó a través de ANOVA con comparaciones de Fisher y Tukey. Los resultados alcanzados para la producción de biomasa y la concentración de clorofila fueron de 13,9 g.m<sup>-2</sup> en 14 días o 1 g.m<sup>-2</sup>. día<sup>-1</sup> y 0,00785 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, evidenciando que la morfología al igual que la productividad de biomasa de la *A. platensis* fueron afectadas por la radiación solar incidente. El estudio concluyó que la radiación solar del área de estudio no fue óptima para cultivar esta microalga en un sistema fotobiorreactor al aire libre.

## **1.2. Bases teóricas especializadas**

### **1.2.1. Biorremediación**

Es una tecnología que emplea la capacidad de biodegradación de los microorganismos, es decir, el potencial metabólico de estos, para limpiar la tierra o aguas contaminadas (Watanabe, 2001). Además, se puede definir como un conjunto de métodos de tratamiento para la contaminación de un medio, que es adecuado para que los sistemas biológicos catalicen la eliminación o transformación de compuestos químicos en otros menos tóxicos (Baltz *et al.*, 2010; Hughes *et al.*, 2000). Estos microorganismos hacen uso de su potencial enzimático en ambientes aeróbicos o anaeróbicos para mineralizar o degradar los compuestos contaminantes hasta productos intermedios. Existen algunos componentes restrictivos, tales como: nutrientes fundamentales (fósforo y/o nitrógeno), receptores de electrones apropiados, escenarios ambientales adecuados (humedad, potencial de hidrógeno y redox) y falta de comunidades microbianas con capacidad enzimática (King *et al.*, 1997).

#### **Tipos de biorremediación**

##### **a. Degradación enzimática**

Consiste en el uso de enzimas en el área contaminada con el fin de degradar las sustancias nocivas. Las enzimas empleadas se obtienen principalmente de microorganismos, ya sean bacterias u hongos que las producen naturalmente o de microorganismos modificados genéticamente. Por ejemplo, las enzimas lipasas (que degradan lípidos) se utilizan en combinación con cultivos de bacterias que permiten degradar las grasas depositadas en las paredes de tuberías de transporte de aguas residuales. Existen distintas enzimas como las proteinasas, celulosas y amilasas que rompen polímeros y reducen proteínas, celulosa y almidón. Al mismo tiempo de hidrolizar polímeros, hay algunas enzimas que pueden reducir compuestos de toxicidad alta (Garbisu *et al.*, 2002).

## **b. Remediación microbiana**

Los microorganismos son aplicados directamente al foco de contaminación, las especies empleadas en biorremediación pueden ser endémicas (originarios), es decir, provenientes del área contaminada o de otros ecosistemas en este caso deberán ser inoculados antes de ser introducidos a la zona que será biorremediada. Dentro de los microorganismos que se emplean para esta técnica están las algas, cianobacterias, bacterias, entre otros. La descontaminación es causada por la capacidad natural de ciertos organismos para convertir moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas y menos tóxicas. De esta forma, los microorganismos pueden degradar compuestos tóxicos para el ambiente y transformarlos en compuestos inofensivos o menos tóxicos, favoreciendo la restauración del área dañada o contaminada (Garbisu *et al.*, 2002).

## **c. Fitorremediación**

Este tipo de biorremediación usa plantas para la limpieza de ambientes o ecosistemas contaminados, puesto que algunas especies vegetales ostentan la capacidad de acumular, absorber y/o tolerar elevadas concentraciones de metales pesados, compuestos radioactivos y orgánicos (Garbisu *et al.*, 2002).

### **1.2.2. Organismos biorremediadores**

Los organismos biorremediadores tienen la capacidad natural de incluir contaminantes durante sus procesos metabólicos y aprovechar el carbono o energía como su fuente (Mosa *et al.*, 2016; Dzionek *et al.*, 2016). Como algunos hongos y/o bacterias sulfatorreductores de los géneros *Aspergillus*, *Pseudomonas*, *Bacillus* y de algunas microalgas como *Spirulina máxima*, *Chlorella sp*, *Scenedesmus obliquus* que han confirmado resistir concentraciones elevadas de metales pesados e inclusive usarlos en sus procedimientos biológicos (Mehrotra *et al.*, 2016; Hema *et al.*, 2014; Jiang y Fan, 2008; Araie *et al.*, 2009). De igual manera los hongos como *Hypholoma fasciculare* y *Coriolus versicolor* demostraron tener una rápida acción al degradar estos compuestos (Zhao y Wang, 2012).

### **1.2.3. Mecanismos bioquímicos desarrollados por los microorganismos para el tratamiento de metales pesados**

Los microorganismos desempeñan un papel vital en la transformación oligoelementos traza, ya que influyen en su biodisponibilidad y remediación, pues alteran su toxicidad solubilidad en agua y la movilidad del elemento (Bolan *et al.*, 2014). La concentración de metales pesados en el medio ambiente es modificada por los microorganismos, dado que estos cuentan con mecanismos enzimáticos y no enzimáticos para eliminar metales en solución (Rajendran *et al.*, 2003).

Entre las transformaciones enzimáticas de metales por microorganismos están incluidos la oxidación, la reducción, la metilación, la desmetilación; esto puede conducir a compuestos poco solubles en agua o compuestos volátiles (Marrero-Coto *et al.*, 2010).

### **1.2.4. Microalga**

Estos microorganismos tienen una capacidad biorremediadora, la cual consiste en biotransformar o eliminar los contaminantes existentes en medios gaseosos o líquidos. El método de acción de estas microalgas hacia los contaminantes es mediante la captación de estos compuestos, siendo recuperados a través de su cosecha. Esta capacidad es consecuencia de un sistema de cultivo con dos fines: producción de biomasa para comercio y eliminación de contaminantes. Estos objetivos penden del método de cultivo, las especies cultivadas y los factores ambientales (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

Las microalgas son sensibles a la exposición de compuestos tóxicos que poseen los metales, es por ello que son utilizadas para detectar los efectos tóxicos que ocasionan y que son causados por varios mecanismos: a) la sustitución o desplazamiento de iones metálicos principales de biomoléculas y unidades funcionales celulares, b) inhibición de grupos funcionales de moléculas biológicamente significativas como enzimas en el sistema de transporte de nutrientes esenciales y de iones (Kaplan, 2004)

### 1.2.5. *Arthrospira platensis*

La *A. platensis* actualmente conocida como *Spirulina* es una cianobacteria filamentosa Gram-negativa, esta se caracteriza por tener una fila de tricomas cilíndricos con 2,5 a 16  $\mu\text{m}$  de ancho, las cuales se hallan divididas por septos perceptibles al microscopio de campo claro, una hélice habitualmente abierta con una distancia de 0 hasta 80  $\mu\text{m}$  entre giros y diámetros de 15 a 60  $\mu\text{m}$  relativamente grandes, como se observan en las Figuras 1 y 2 (Vonshak y Tomaselli, 2000).

Para la *A. platensis*, el rango óptimo de pH se encuentra entre 9 y 10 y permite hasta pH 11,5, sin embargo, no se desarrolla a pH 7. Se realizó el aislamiento de diversas cepas para conocer la temperatura ideal de crecimiento, concluyendo que algunas cepas toleran temperaturas entre 24 – 28 °C mientras que otras llegan hasta 40 – 42 °C. La disposición de fijación de CO<sub>2</sub> logra llegar al 38 %, por esto es una de las más significativas entre las microalgas (Tomaselli, 1997).

Esta microalga tiene una composición aproximada de entre 60 a 70 % de proteína, también contiene vitaminas A (0,11 a 0,2 mg), Tiamina (3 a 4 mg), Riboflavina (2,5 a 3,5 mg), Piridoxina (0,5 a 7 mg), Cobalamina (0,15 a 0,25 mg), Potasio (2,2 mg), Tocoferol (5 a 7 mg), ácido fólico (4 a 5 mg) y minerales cerca al 7 % (Olvera-Ramírez *et al.*, 2003).

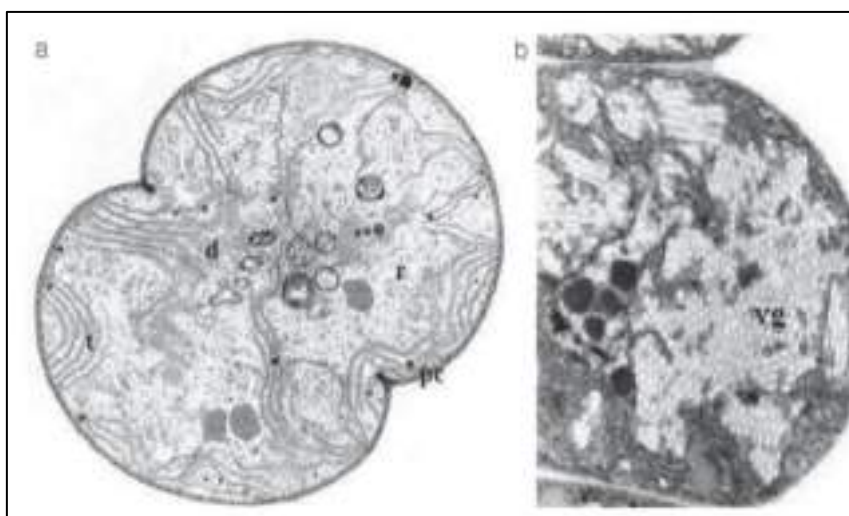


Figura 1. Estructura celular. a: fibrillas de DNA, donde pc: pared celular, t: sistema de membranas tilacoidales, y r: ribosomas. Fuente: Olvera-Ramírez *et al.* (2003).



Figura 2. Vista microscópica de la *Arthrospira platensis*. Fuente: Elaboración propia.

### Taxonomía de la especie *Arthrospira platensis*

A continuación, en la Tabla 1 se muestra la clasificación taxonómica de la microalga *A. platensis*.

**Tabla 1**

*Clasificación taxonómica de la especie Arthrospira platensis*

Característica	Descripción
Dominio	Prokaryota
Sub-dominio	Bacteria
Phylum	Cyanobacteria
Clase	Cyanophyceae
Orden	Oscillatoriales
Familia	Phormidiaceae
Género	<i>Arthrospira</i>
Especie	<i>Arthrospira platensis</i> (Nordstedt) <i>Gomont</i>

Fuente: Guiry y Guiry (2013).

#### 1.2.6. Usos de la *Arthrospira platensis*

Esta microalga es una fuente natural de nutrientes como: proteínas, vitaminas, aminoácidos, minerales entre otros, por ende, su uso primordial es como suplemento alimenticio, que

pueden consumirse en capsulas, polvos, tabletas, sopas, pastas, bebidas y otros usos (Sasson, 1997) (Koru, 2012).

La desnutrición es uno de los problemas más difíciles que afrontan los países en desarrollo, por ende, la creación o descubrimiento de formas alternas de alimento son de suma importancia. Una fuente alternativa es la *A. platensis*, esto debido a que además de sus propiedades nutritivas, ésta microalga crece en aguas altamente alcalinas lo que reduce significativamente la probabilidad de que pueda contaminarse; tiene una pared celular delgada, compuesta por mucopolímeros y polisacáridos, no cuenta con celulosa facilitando así su digestión, y a diferencia de otras algas como la *Chlorella sp.* no se requiere de esfuerzo para la cosecha, finalmente, existen estudios toxicológicos que concluyen que es inocua (Chamorro y Salazar, 1995; Chamorro *et al.*, 1996).

Asimismo, es empleada con mayor continuidad como fuente de pigmentos naturales, ácidos grasos y vitaminas, también en la producción de agregados usados en formulas farmacéuticas y alimentos (Robledo, 1997). La *A. platensis* en acuicultura es utilizada como alimento para moluscos, microcrustáceos (*Artemia sp.*) y los peces, siendo este último beneficioso ya que ayuda a conservar sana su piel e incrementa su coloración, además incrementa la supervivencia, fertilidad y tasas de crecimiento. En ciertos países es empleada como alimento para gatos, aves de ornato y perros generalmente en hembras con crías, sementales y vacas (Koru, 2012).

Por otro lado, se han realizado diferentes estudios en los últimos años en cuanto a los efectos que *A. platensis* tendría sobre los seres humanos y roedores. Los efectos más relevantes son anticancerígenos, antivirales, inmuno-regulación, antioxidantes y contra la hiperglicemia e hiperlipidemia (Belay, 2002). De igual manera, se ha probado de forma experimental *in vivo* e *in vitro*, la efectividad que tiene en tratamiento de alergias, leucemia y anemia (Liu *et al.*, 2000), en reducción de hepatotoxicidad, diabetes, obesidad, enfermedades virales y cardiovasculares, procesos inflamatorios e inmunodeficiencia u otras afecciones (Chamorro *et al.*, 2002).



### 1.2.7. Cinética de crecimiento

La *A. platensis*, presenta las siguientes fases de desarrollo durante su crecimiento:

- Fase de adaptación: la *A. platensis* se acomoda a las condiciones determinadas, esta microalga presenta una tasa de crecimiento baja, incrementándose gradualmente durante el tiempo de cultivo (Becker y Venkataram, 1982)
- Fase de crecimiento exponencial: la microalga *A. platensis* se adecua a las condiciones de crecimiento. La multiplicación celular se hace evidente cuando las células empiezan a ocultarse una sobre otra, este proceso disminuye la iluminación pues impide el ingreso de luz. Así también, la inhibición del crecimiento microalgal se exhibe como consecuencia de la pérdida de nutrientes además de la interferencia de la respiración celular (Becker y Venkataram, 1982)
- Fase estacionaria: esta fase permite ver que la tasa de crecimiento se aminora, igualmente el ingreso de luz a las células de *A. platensis* es restringido y la respiración celular sufre un incremento. Como consecuencia del metabolismo oxidativo microalgal existe una reducción de biomasa. Es en esta fase que la curva de crecimiento alcanza el valor máximo de concentración de biomasa aproximado propiciando un balance entre la concentración máxima y la pérdida de biomasa esto último generado por procesos de degradación (Becker y Venkataram, 1982)
- Fase de deceso: las células microalgales de *A. platensis* decrecen y originando materia orgánica en su medio. De esta forma se denota la fase final del ciclo de crecimiento de la microalga que a su vez tiene un ingreso restringido de nutrientes y luz (Becker y Venkataram, 1982).

## **Factores de crecimiento**

- **Oxígeno**

El nivel de oxígeno es un parámetro de importancia en los cultivos microalgales, por tanto, debe ser controlado, dado que la fijación de carbono por la enzima RuBisCo es inhibida por las concentraciones altas de oxígeno, la enzima se ubica en el cloroplasto de microorganismos autótrofos.

Otro de los efectos perjudiciales en el que intervienen el oxígeno y la luz durante el cultivo microalgal es el proceso de fotooxidación. Esto debido a la toxicidad del exceso de oxígeno para los organismos que deben protegerse de diferentes maneras de este elemento. Las algas y microalgas utilizan para protegerse a los carotenoides, superóxido dismutasa y otras moléculas que logran combinarse con el exceso de oxígeno y elevadas intensidades luminosas. Es por ello, que la sobresaturación de oxígeno en conjunto con la carencia de dióxido de carbono en el cultivo produce el fenómeno conocido como fotooxidación y puede acabar en muy poco tiempo con las algas o microalgas del cultivo. En cultivos a gran escala este fenómeno es sumamente delicado (Richmond, 1986).

- **pH**

Este parámetro fisicoquímico media el equilibrio químico de CO<sub>2</sub> y la proporción de las especies y por ende la alcalinidad del medio, además influye en la forma química que se hallan algunos nutrientes y micronutrientes. Todas las especies de alga o microalga tienen un rango de pH óptimo que maximiza su crecimiento. El pH en la mayoría de los cultivos de algas o microalgas está en un rango de 7 y 9, con un valor de pH óptimo entre 8,2 – 8,7 (Richmond, 1986).

Por otro lado, la ingestión de carbono inorgánico por las algas y/o microalgas durante su cultivo incrementa el pH del medio de cultivo desplazando así el equilibrio de este a los carbonatos. Las microalgas ven comprometido su crecimiento al no usar carbonatos (Richmond, 1986).

- **Agitación**

La agitación durante el cultivo de microalgas favorece el transporte de oxígeno, impidiendo las adherencias en las paredes y sedimentación en el reactor a su vez mejora la distribución de los gases, permite el ingreso de la luz y homogeniza el pH (Ruíz-Martínez, 2011).

- **Temperatura**

La temperatura es uno de los parámetros fundamentales en la reproducción de las microalgas ya que está relacionada directamente con la velocidad de crecimiento de las mismas. Se debe considerar dos tipos de temperatura como referencia a escala de laboratorio: siendo la primera la temperatura ambiental y la segunda temperatura a considerar es la del medio de cultivo líquido (Cuesta y Serrano, 2006).

Las especies de microalgas más comunes cultivadas toleran temperaturas en rangos de 16 y 27 °C, variando por diferentes parámetros como: las especies, cepa en cultivo y el medio de cultivo. Sin embargo, el valor promedio empleado es de 18 – 20 °C, las mismas que se controlan mediante incubadoras a temperatura constante (Carbonell y Tamayo, 2018).

### **1.2.8. Río Chillón**

Las nacientes del río Chillón se sitúan en los alrededores del flanco occidental de la Cordillera La Viuda, en las lagunas Aguascocha, Puracocha y Chunchón, a una latitud aproximada de 4 600 m.s.n.m., discurriendo de NE – SO (Figura 3) con rumbo generalizado y los ríos Huancho, Yamacoto, Ucaña y Quisquichaca son sus efluentes más relevantes (Vera-Hernández, 2002).

La cuenca hidrográfica del río Chillón corresponde políticamente a la provincia de Canta ubicada en la Región Lima. Están incluidas dentro del área geográfica 22 comunidades campesinas, las cuales corresponden a 7 de los distritos de la provincia de Canta: Huamantanga, Canta, Lachaqui, Huaros, Arahuy, Santa Rosa de Quives y San Buenaventura (Vilcapoma, 2007)



Figura 3. Delimitación de la cuenca del río Chillón. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN),2006

Según Olarte (2007), en un estudio de calidad y medio ambiente de la Cuenca del río Chillón nos revela sobre las tres partes de la cuenta, donde el relieve es similar al de una hoya hidrográfica alargada, de fondo profundo y quebrado. A continuación, se describirá brevemente cada una:

- La cuenca baja: ubicada a una altitud de entre cero y 800 m.s.n.m., partiendo de la desembocadura en el mar hasta el distrito de Carabayllo. En la parte baja existe vegetación escaza y vegetación típica de las lomas en algunos de los cerros que comprende esta zona
- La cuenca media: ubicada a una altitud de entre 800 y 2 500 m.s.n.m., partiendo del distrito de Carabayllo hasta el pueblo de Yaso. Mientras se asciende predominan los arbustos y las cactáceas columnares, que alcanzan el verdor típico de la serranía.
- La cuenca alta: ubicada a una altitud entre los 2 500 y 4 850 m.s.n.m., partiendo desde el pueblo de Yaso hasta las Lagunas de Aguascocha, Pucococha y Chuchún, las cuales

dan origen al río Chillón. El paisaje dominante es característico del microclima puna, con heladas frecuentes y clima frío.

### **1.2.9. Contaminación de ríos en el mundo**

El agua dulce del mundo es un recurso escaso, amenazado y en peligro. Según la investigación sobre el balance hídrico de la tierra, en realidad solo el 0,007 % del agua dulce puede ser utilizada directamente por los seres humanos. De esta pequeña parte dependen importantes procesos sociales vitales. La última evaluación de expertos en temas hídricos y organizaciones internacionales muestran, que para el año 2025, dos tercios de los seres humanos sufrirán algún estrés por la falta de este líquido (L'vovich, 1995, citado por Toledo, 2002, p. 9).

#### **a. Contaminación de ríos en el Perú**

En cuanto a la calidad del agua, el principal problema del país es la descarga de aguas residuales que no se tratan adecuadamente, estas aguas residuales son domiciliarias o provienen del área productiva. En Perú, la contaminación de gran parte de los ríos es originado por el vertido incontrolado de elementos y sustancias nocivas que se encuentran dentro de los efluentes procedentes de actividades industriales, mineras, metalúrgicas y agrícolas. A esta polución provocada por el vertimiento de contaminantes químicos peligrosos se suma el vertimiento de aguas servidas en ríos y lagos sin previo tratamiento. En relación con la contaminación del agua de mar es propiciada por efluentes de las industrias pesqueras y del vertido del alcantarillado doméstico en las zonas costeras (Bustíos *et al.*, 2013).

#### **b. Contaminación de ríos en la costa**

En Perú, como en otros países de América del Sur los ríos discurren por vastas áreas altoandinas hasta alcanzar la costa llevando sólidos sedimentables de la cuenca, además de efluentes provenientes de industrias, aguas residuales y soluciones agroquímicas de áreas agrícolas (Rivera y Díaz, 2004).

### **c. Contaminación del río Chillón**

En los últimos años el río Chillón se ve afectado por la contaminación a lo largo de la cuenca por una serie de factores como son: procesos biológicos, estructura geográfica del área, actividades humanas e industria, entre otros; propiciando la contaminación del agua y es la cuenca baja de este río la más afectada. La fuente principal de contaminación del río Chillón proviene de las descargas de aguas servidas tanto domésticas como industriales, la mala disposición de residuos sólidos, fundiciones informales, actividades comerciales como curtiembres y papeleras. La inexistente iniciativa o planes de mejora de calidad de agua, la ausencia de saneamiento básico, la falta de tratamiento previos en los efluentes vertidos que son generados por la industria y el incumplimiento y ausencia de cultura ambiental en las poblaciones aledañas ocasiona el deterioro de la ribera y del río Chillón (Reyes, 2012).

#### **1.2.10. Contaminación de agua con metales pesados**

La tasa de contaminación del agua se puede estimar en 2 000 millones de metros cúbicos por día. Una crisis en este recurso es evidente para los próximos años. Diversos entes ambientales y la Organización Mundial de la Salud (OMS) instauraron diferentes escalas de riesgo basados en la concentración de metales en el agua de expendio humano y para su uso en alimentos. Los mapas elaborados en distintas regiones del mundo evidencian un aumento significativo de la concentración de metales por sobre los límites determinados, clasificándolos como de alto riesgo (Arnous y Hassan, 2015).

#### **1.2.11. Metales pesados**

Este tipo de elementos químicos son sustancias generadas de forma natural o antrópica cuyo peso molecular es alto, su uso es altamente difundido debido a que se puede emplear en diferentes actividades, por ejemplo, el cadmio y plomo son usados por las fábricas para elaborar tubos. Los efectos que estos elementos generan por su uso desmedido o no controlado en el medio ambiente y la salud humana tienen efectos adversos o en algunos casos nocivos (Romero, 2009).

## **Cromo**

El agua y el aire están contaminados con  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{4+}$  debido a las actividades humanas. La concentración de cromo en el aire como partículas puede aumentar por la quema de petróleo y carbón, la fabricación de acero, la soldadura de acero inoxidable, la fabricación de productos químicos y el uso de productos que contienen cromo. La contaminación del agua es causada por la descarga de desechos derivados de la fabricación de tintes y pigmentos para curtir cueros; la mayoría de las veces el cromo se va al fondo y se diluye en el agua solo una pequeña parte (Molina *et al.*, 2010).

El cromo se presenta en diferentes estados de oxidación siendo el  $\text{Cr}^{3+}$  y el  $\text{Cr}^{4+}$  los más comunes. El cromo se comporta de dos maneras diferentes cuando está en contacto con personas. El  $\text{Cr}^{3+}$  es elemento esencial en los procesos fisiológicos y bioquímicos imprescindibles para la vida. En particular, posee efectos sobre el metabolismo de los ácidos grasos, glucosa y el colesterol, también juega un rol primordial en diversas reacciones generadas por enzimas. El  $\text{Cr}^{4+}$  tiene alta toxicidad en los seres humanos y es clasificado por la *International Agency for Research on Cancer* [IARC] dentro del grupo probado como carcinógeno en humanos, puesto que causa cáncer en las vías respiratorias cuando existe una exposición ocupacional (Téllez *et al.*, 2004).

- **Toxicología del Cromo**

La toxicidad se basa en los derivados de  $\text{Cr}^{6+}$  que a diferencia del  $\text{Cr}^{3+}$ , penetran más fácilmente en el cuerpo. El  $\text{Cr}^{6+}$  está clasificado como carcinógeno del grupo I por la *International Agency for Research on Cancer* [IARC]. No se ha demostrado que el  $\text{Cr}^{3+}$  sea cancerígeno (Cuberos *et al.*, 2009).

- **Toxicocinética**

El Cr se absorbe por vía respiratoria, oral y cutánea. Se distribuye en la médula ósea, bazo, riñón, ganglios linfáticos, pulmones e hígado. El  $\text{Cr}^{6+}$  es absorbido rápidamente por los glóbulos rojos y se integra a otras células a través del sistema de transporte de sulfato es

rápido tomado por los eritrocitos e integrado a otras células por el sistema transportador de sulfatos (Cuberos *et al.*, 2009).

- **Metabolismo**

El  $\text{Cr}^{6+}$  a nivel de mitocondria y núcleo, disminuye rápidamente a (+3) en la célula. En el citoplasma, se reduce por agentes reductores intracelulares como el ácido ascórbico, glutatión, riboflavina y flavo enzima. La reducción intracelular produce intermedios reactivos, como  $\text{Cr}^{5+}$ ,  $\text{Cr}^{4+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$ , así como radicales libres de oxígeno e hidroxilo. Estas formas de reacción de Cr tienden a cambiar el ADN (Cuberos *et al.*, 2009).

- **Química en medio acuoso**

El cromo en medio acuoso puede estar presente de varias formas o estados de oxidación desde 0 hasta 6+ pero las formas más frecuentes en las que lo podemos hallar son  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$ . El  $\text{Cr}^{3+}$  es un ácido que forma un fuerte complejo octaédrico hexacoordinados como amonio, agua etilendiamina y otros ligandos orgánicos que contengan dadores de electrones como nitrógenos, oxígeno y otros. Estas tipologías generan que este elemento químico sea menos soluble en agua, con menor movilidad, menos tóxico y mutagénico en comparación con el cromo hexavalente. Asimismo, el  $\text{Cr}^{3+}$  es fundamental en el metabolismo de los mamíferos dado que juntamente con la insulina propicia la reducción de niveles de glucosa y a su vez puede, en ciertos casos, controlar la diabetes. Además, el cromo trivalente reduce el colesterol en sangre y disminuye la concentración de lipoproteínas de baja densidad en sangre.

De la misma forma, el  $\text{Cr}^{6+}$  que es un agente oxidante nocivo para la salud convirtiéndose en una especie peligrosa; el proceso de adsorción de esta sustancia química utilizando materiales biológicos en medios acuosos es través de la interacción de sitios cargados positivamente en el adsorbente anión de  $\text{Cr}^{6+}$  mismo que se conservará unido a la superficie del biomaterial si este contiene grupos de electrones donadores biomaterial o protones en la fase acuosa. La rapidez en la remoción de cromo se acrecienta con el incremento de la cantidad del biomaterial y la concentración. El aumento de la temperatura también es un



factor que incrementa la remoción de cromo como consecuencia de la naturaleza endotérmica de la reacción redox (Araujo, 2016).

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Diseño de la Investigación**

La presente investigación muestra un enfoque cuantitativo, dado que, en base a un marco teórico-referencial se formularon las hipótesis de investigación y mediante el procesamiento y análisis de datos se probó la hipótesis planteada (Hernández *et al.*, 2010). El diseño de la investigación corresponde a un diseño experimental.

#### **2.1.1. Lugar y fecha**

Las muestras de agua obtenidas para los ensayos del presente estudio fueron recolectadas en el río Chillón, estación Puente Chillón E-06 ubicada en el cruce de la Panamericana Norte y la ribera del río en el distrito de Puente Piedra, Lima, Perú. La estación de monitoreo de aguas perteneciente a la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), con las coordenadas UTM- WGS84 274312,00e 8681909,00n (Figura 4). La ejecución del proyecto de investigación (revisión literaria, experimentación, informe de investigación) tuvieron una duración de 19 meses comprendidos entre octubre del 2019 a diciembre del 2020.

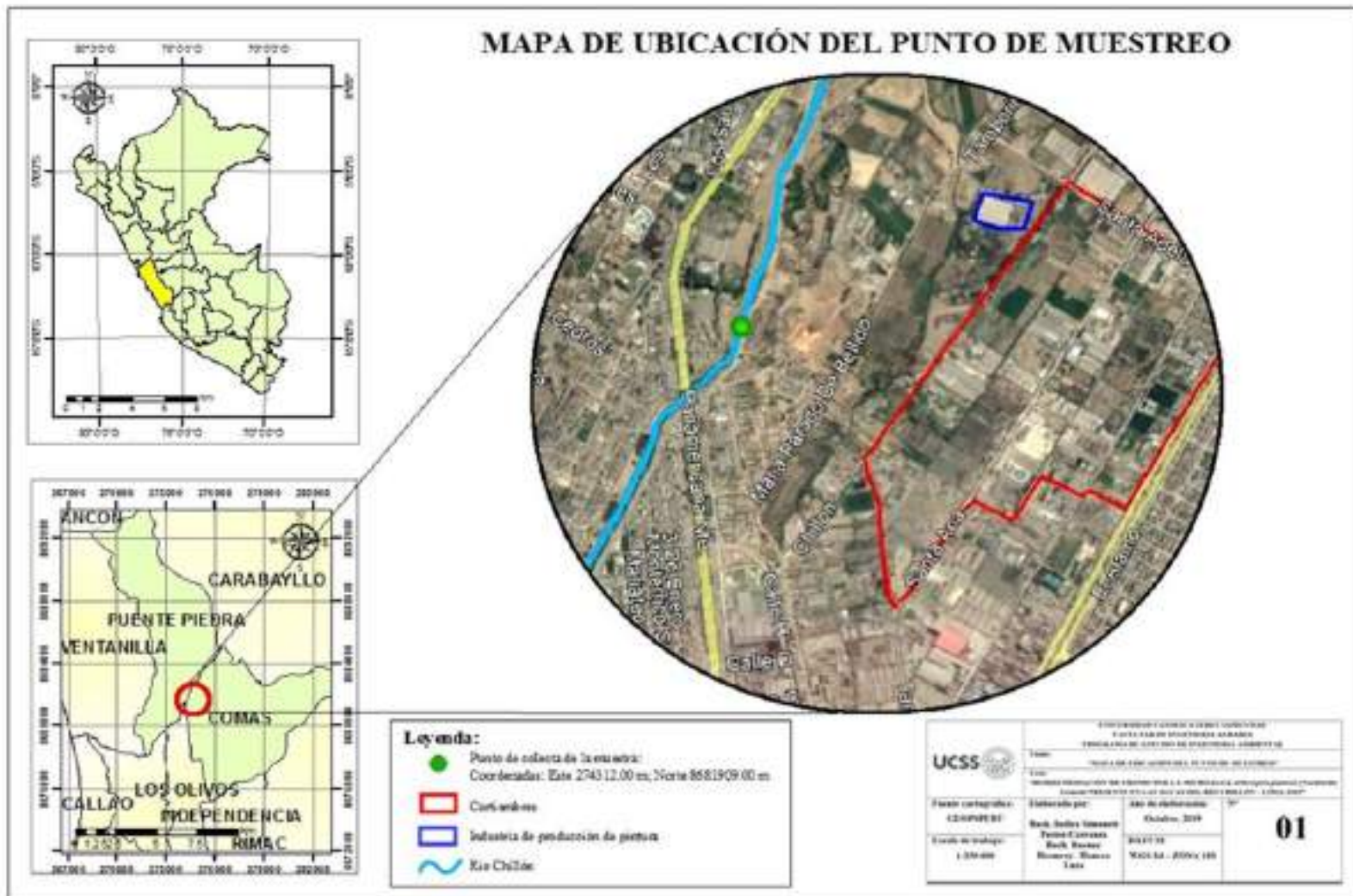


Figura 4. Mapa de la localización del punto de muestreo de aguas estación Puente Chillón E-06 en cruce Panamericana Norte y río Chillón.  
Fuente: Elaboración propia realizado en el programa ArcGis 10.5.

## 2.1.2. Descripción del experimento

### Experimentación Preliminar

Previo al desarrollo de la investigación fueron realizadas las pruebas preliminares para determinar las concentraciones y condiciones para ejecutar de forma adecuada el estudio; dentro de estas pruebas fue elaborado el estudio de propagación de biomasa en fotobiorreactores (FBR) los cuales estaban estructurados de la siguiente manera: envases de vidrio de 300 ml, el oxígeno fue generado por un aireador que ingresó a través de una manguera de pecera, la iluminación fue dada por paneles LED (luz constante), el medio de cultivo fue Solución Hidropónica La Molina ® Modificada y cepa de *A. platensis*.

Durante la ejecución de la prueba de propagación de biomasa de *A. platensis* fue presenciado un proceso anómalo dentro de los FBR; puesto que durante los primeros días de prueba los FBR presentaron un color verde intenso y días después el cultivo cambió de color a verde oxidado con tendencia amarilla, al apreciar este cambio se realizó una revisión bibliográfica para determinar el tipo y causa de este proceso. Tras la investigación fue establecido que el proceso generado al interior de los FBR es denominado Fotooxidación y/o Fotoinhibición, este proceso se muestra como una decoloración de los pigmentos dependientes de la luz y oxígeno, como lo menciona Powles (1984), generando efectos mortíferos en las células y a su vez ocasionar la pérdida del cultivo en su totalidad. Así también, el oxígeno es otro factor relacionado con este proceso; ya que, concentraciones elevadas de este elemento disminuyen la tasa de ingreso fotosintético del carbono en forma de un componente de retroalimentación, promoviendo algunas veces la pérdida en su totalidad de los cultivos (Abalde *et al.*, 1995).

Por último, Chen *et al* (2011) sustenta que elevadas intensidades de luz y elevadas concentraciones de oxígeno propician inhibición en el proceso fotosintético de la microalga provocando el envejecimiento prematuro y/o muerte de la microalga, de esta forma queda explicado el proceso anómalo dado en el interior de los FBR durante la realización de las pruebas preliminares. Por ello, para la ejecución de la fase experimental de esta investigación se estableció el uso de reguladores de flujo de oxígeno los cuales fueron acoplados a las

mangueras de pecera que transportaron el oxígeno al interior de los FBR, asimismo, para la iluminación fue determinado el uso de paneles LED de menor intensidad.

**Fase experimental:**

En las Figuras 5 y 6 muestran los flujogramas de las dos etapas del estudio que contienen los pasos seguidos para la realización de la investigación.

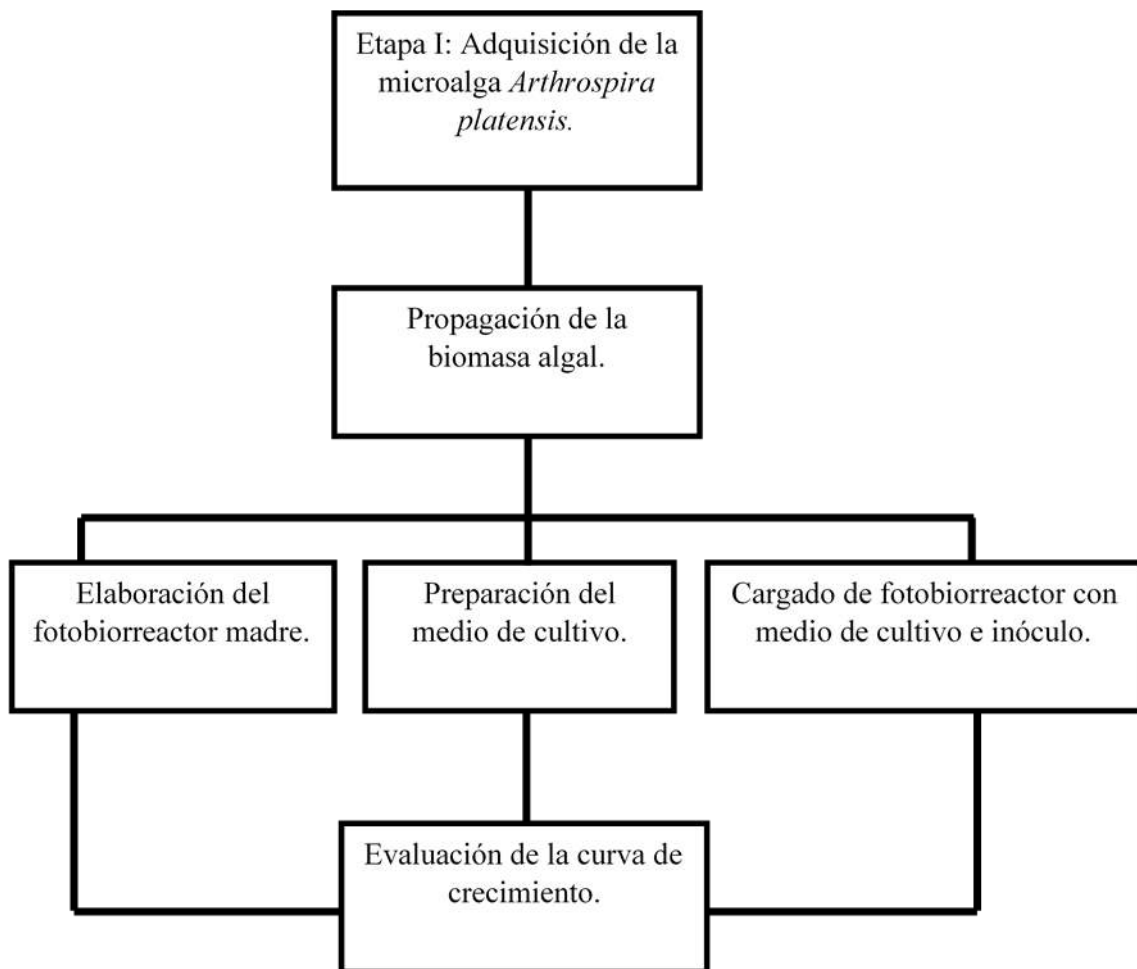


Figura 5. Diagrama de flujo para la propagación de biomasa en condiciones de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

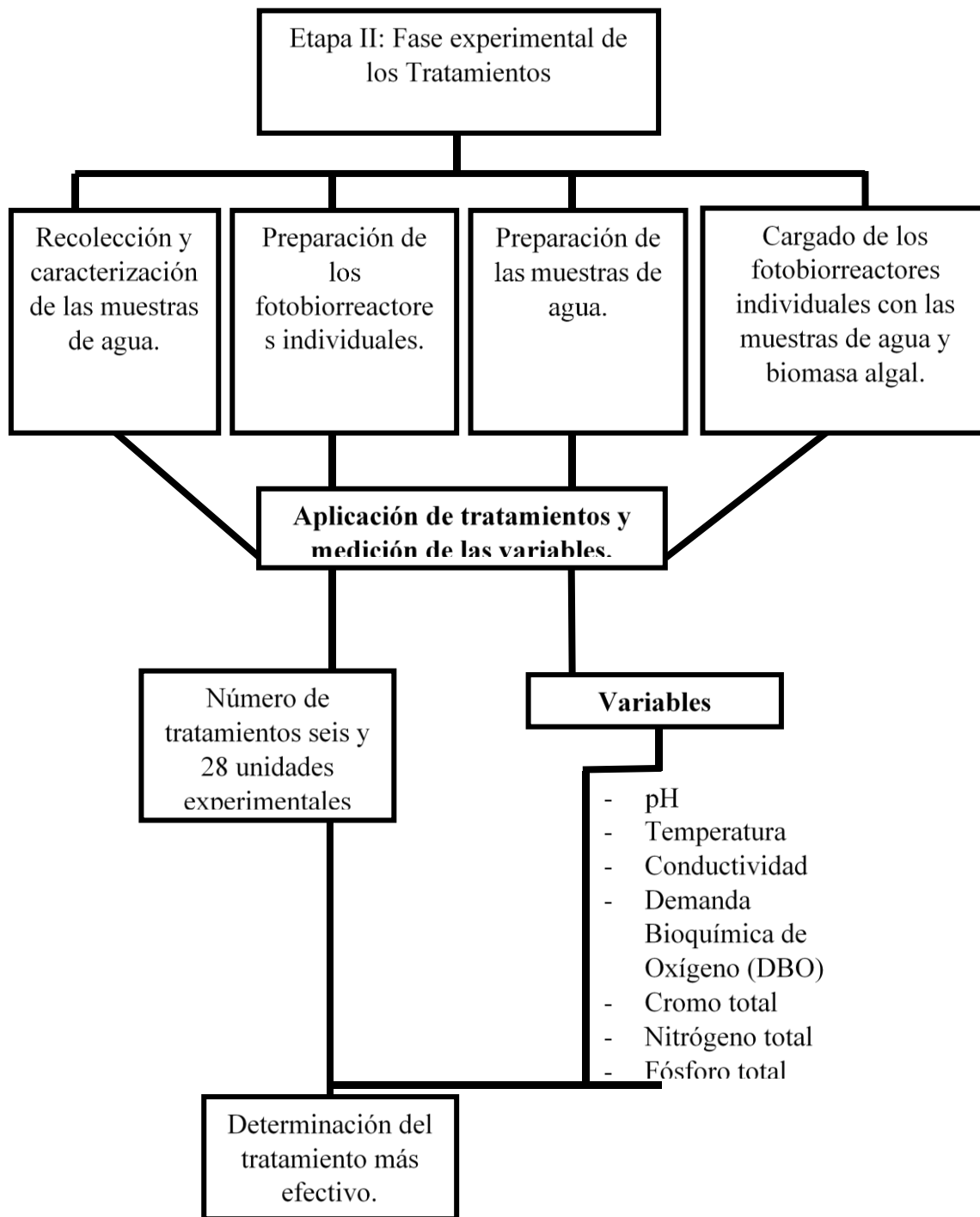


Figura 6. Diagrama de flujo para la aplicación de tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

## **Preparación del fotobiorreactor**

La estructura del sistema de cultivo batch estuvo compuesta por lo siguiente:

Para la construcción del fotobiorreactor generador de biomasa que denominamos “fotobiorreactor madre”, se empleó un frasco de vidrio transparente de 3 litros con una tapa hermética con dos orificios, dado que un orificio sirvió para que ingresara el oxígeno y el otro para eliminar el intercambio de gases que se generó durante todo el proceso, la fuente de iluminación fue dada por un panel LED (de 20 watts, 1 800 lux con un voltaje de 240 V con frecuencia de 60 Hz y sin fotoperiodo, es decir, luz constante), la aireación continua del sistema fue generada por un aireador BIG – BOY B-10200 (con un voltaje 220 V, frecuencia de 600 Hz y una salida de  $3\ 500\ \text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ), el oxígeno por el aireador ingresó al fotobiorreactor a través de una manguera de pecera con un regulador de flujo en medio (Figuras 7 y 8), para la agitación de este fotobiorreactor se empleó un Vortex, a temperatura ambiente.

Asimismo, para los fotobiorreactores de las unidades experimentales se usaron botellas de vidrio transparente de una capacidad de 475 ml con un tapón hermético en la parte superior, por donde ingresó la manguera de pecera para dotación de oxígeno; además este permitió la salida de gases que se generó durante el proceso de estudio, las fuentes de iluminación fueron dos paneles LED (de 20 watts, 1 800 lux con un voltaje de 240 V con frecuencia de 60 Hz y sin fotoperiodo, es decir, luz constante), el oxígeno fue generado por 2 aireadores BIG – BOY B-10200 (con un voltaje 220, frecuencia de 600 Hz y una salida de  $3\ 500\ \text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ); la distribución del oxígeno se realizó a través de mangueras de peceras interconectadas en forma de ramas con válvulas reguladoras permitiéndonos manejar la cantidad de oxígeno que ingresaba en cada fotobiorreactor a temperatura ambiente (Figura 9), y por último la agitación de las unidades experimentales se realizó manualmente (Sánchez, 2014).

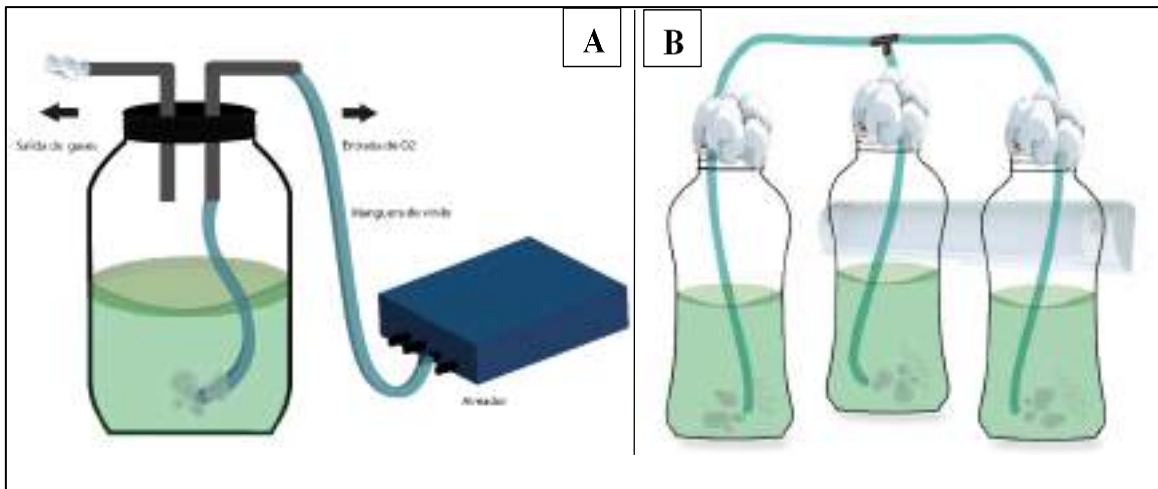


Figura 7. a. Diseño estimado del fotobiorreactor madre. b. Diseño estimado de fotobiorreactores individuales. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8. a. Fotobiorreactor madre durante la propagación de biomasa. b. Aireador BIG-BOY B-10200. Fuente: Elaboración propia.



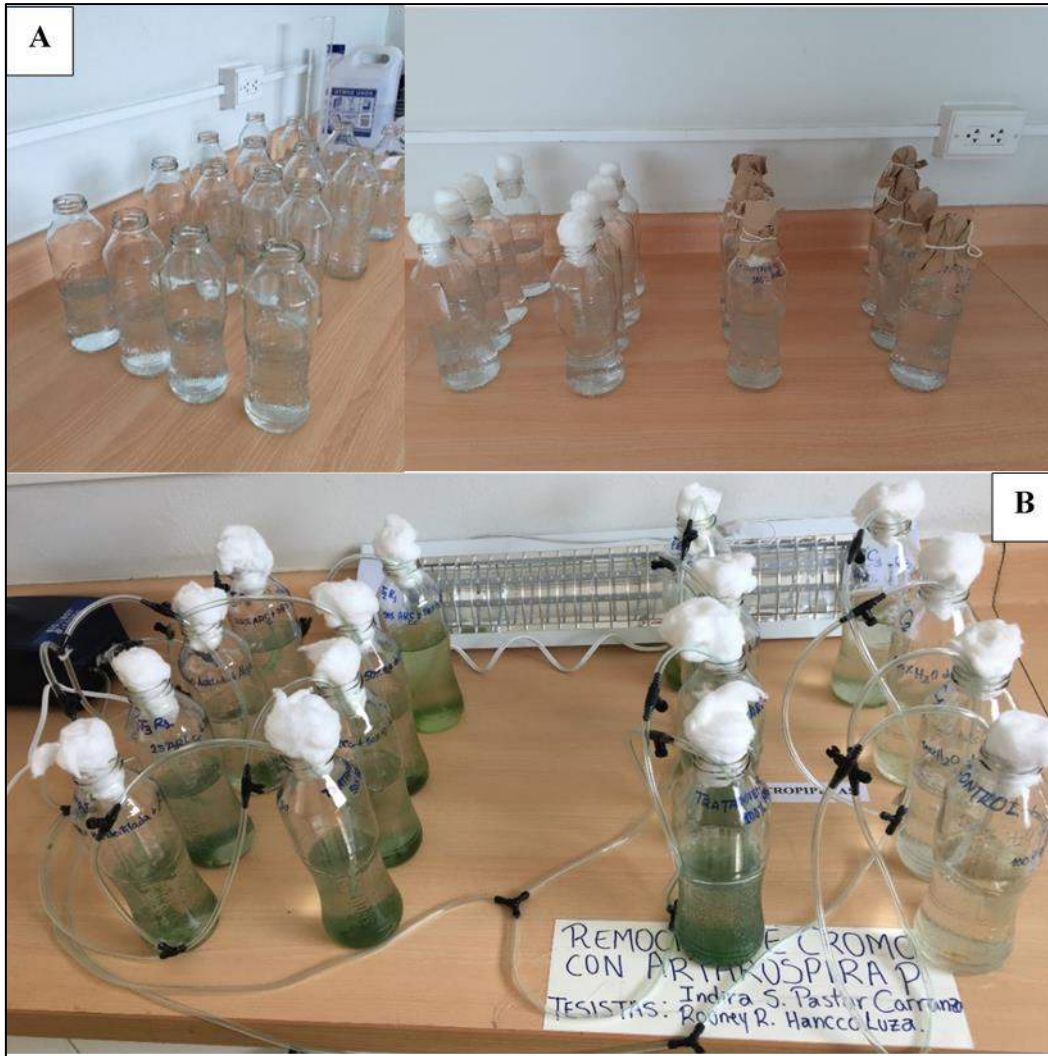


Figura 9. a. Fotobiorreactores individuales en proceso. b. Fotobiorreactores individuales en proceso de aplicación de tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

### Preparación de medio de cultivo y obtención de biomasa de *A. platensis*

El procedimiento tras la adquisición de la cepa de *A. platensis*, consistió en generar biomasa algal a través de cultivo batch empleando como medio de cultivo la solución hidropónica de La Molina® la cual fue modificada siguiendo las especificaciones de Sánchez (2014), en proporciones de 0,5 ml. L<sup>-1</sup> de solución B, 2,5 ml. L<sup>-1</sup> de solución A, 16 g. L<sup>-1</sup> de Bicarbonato de Sodio y 1 000 ml de agua destilada, tras la preparación del medio éste fue esterilizado en el autoclave a 15 psi de presión, 121 °C durante 20 minutos, esto para evitar la contaminación de la cepa con otros microorganismos, paso seguido se procedió a cargar el fotobiorreactor con el medio de cultivo más la cepa de la microalga como se muestra en la Figura 10, por último se evaluó durante los días siguientes el ritmo de crecimiento de la microalga dentro del fotobiorreactor a temperatura ambiente.



*Figura 10. Preparación del medio de cultivo y cargado del fotobiorreactor madre. Fuente: Elaboración propia.*

### **Evaluación de crecimiento poblacional por extracción de clorofila “a”**

Una vez establecido el fotobiorreactor para la obtención de biomasa algal, se procedió a evaluar el crecimiento poblacional mediante la cuantificación de clorofila “a” usando el protocolo de extracción de clorofila “a” con el método de Extracción con Metanol al 90 % de Azov (Azov, 1982) cuya metodología consiste en lo siguiente:

- Tomar alícuotas de 2 ml del cultivo y centrifugar a 3 500 rpm durante 15 minutos.
- Decantar el sobrenadante y adicionar 6 ml de metanol al 90 % al paquete celular. Agitar el tubo y colocarlo en baño maría a 60 °C por 10 minutos.
- Guardar en el refrigerador a 4 °C durante 24 horas.
- Añadir 4 ml de metanol al 90 % para ajustar el volumen a 10 ml y centrifugar en las mismas condiciones.
- Determinar la absorbancia con un blanco de metanol al 90 % en un espectrofotómetro a 665 nm y 750 nm.

## Cálculos

Calcular la concentración de clorofila “a” mediante la siguiente ecuación (Azov,1982):

$$\text{Clorofila a (mg.L}^{-1}\text{)} = 13,9 (A_{665 \text{ nm}} - A_{750 \text{ nm}}) U/V$$

Donde:

A = Absorbancia

U = Volumen de metanol

V = Volumen de muestra

La cinética de crecimiento de la microalga fue fijada mediante la toma de alícuotas cada 24 h. Con los valores obtenidos mostrados en el Apéndice 7, fueron elaboradas la curva de crecimiento y la determinación de los parámetros cinéticos: tiempo de duplicidad, tasa máxima de crecimiento durante la fase exponencial y capacidad de carga (Sánchez, 2014). Para ello se recurrió a los siguientes cálculos:

Tasa de crecimiento continuo: se usará la siguiente ecuación.

$$\ln N_t = a + bt(1)$$

Siendo equivalente a:

$$N_t = N_0 e^{\mu t}(2)$$

Donde:

$N_t$ : población final

$N_0$ : población inicial

e: constante neperiana

$\mu$ : tasa de crecimiento exponencial

Td: tiempo de duplicidad

Tiempo de duplicidad (td):

$$T = \frac{\ln(2)}{r}$$

Donde:

r: tasa de crecimiento exponencial.

Capacidad de carga (k):

$$Nt = \frac{K}{1 - \left(1 - \frac{K}{N0}\right) e^{-\mu t}}$$

Donde:

Nt: población en el tiempo t

μ max: tasa máxima de crecimiento

k: capacidad de carga del cultivo

### **Toma de muestras de aguas del río Chillón, Lima**

Las muestras de agua fueron colectadas del efluente del río Chillón departamento de Lima en la estación E-06 de monitoreo de agua de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) con las coordenadas UTM-WGS 84 274312,00e 8681939,65n (Figura 11). Las muestras fueron recogidas siguiendo el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad en Cuerpos Naturales de Agua Superficial de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) (Autoridad Nacional Del Agua [ANA], 2016).

### **Caracterización fisicoquímica de las muestras de agua del río Chillón**

La caracterización fisicoquímica del agua del río Chillón se realizó en dos etapas: la primera etapa de caracterización fue *in situ*, es decir, en el sitio de la colecta de muestras se midieron los parámetros de pH, conductividad, temperatura paso seguido se rotularon las muestras, se realizó el llenado de los formatos de cadena de custodia (ver Apéndice 1) por último, las muestras se guardaron en cajas térmicas a 4 °C para su posterior traslado siguiendo el protocolo de toma de muestra de la Autoridad Nacional del Agua del año 2016 (ANA, 2016); la segunda etapa se llevó a cabo *ex situ* en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Facultad de Ingeniería Agraria - Programa de Estudio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica Sedes Sapientiae antes de la caracterización *ex situ* las muestras fueron filtradas con papel filtro Rundfilter® de 125 mm para eliminar las partículas en suspensión (Figura 12), los parámetros medidos fueron: nitrógeno total, fósforo total, plomo y cromo total tras ello las muestras fueron guardadas a 4 °C hasta su posterior uso.



*Figura 11.* Toma de muestras de agua. *Fuente:* Elaboración propia.



*Figura 12.* Proceso de filtrado de la muestra de agua. *Fuente:* Elaboración propia.

## Preparación de los efluentes

Las muestras de agua colectadas en la estación E-06 del río Chillón fueron filtradas con papel filtro (Rundfilter® de 125 mm) para eliminar las partículas en suspensión. A continuación, las muestras de agua fueron puestas en botellas de vidrio de 475 ml de capacidad las cuales fueron acondicionadas para ser biorreactores individuales cada uno de estos fue relleno con 300 ml de agua siguiendo los tratamientos planteados para esta investigación, paso seguido se realizó la esterilización en autoclave a una temperatura de 121 °C, 15 psi de presión durante 20 minutos, para evitar el desarrollo de otro tipo de microorganismos presentes en las aguas colectadas como lo menciona Huarachi *et al.* (2015b).

La biomasa algal usada en los tratamientos fue estimada siguiendo la metodología propuesta por Barroso *et al.* (2019), quienes emplearon biomasa algal viva de *Spirulina sp.* para la remoción de cromo de aguas residuales en una proporción de 20 g. L<sup>-1</sup> por cada uno de los biorreactores de su investigación.

### 2.1.3. Tratamientos

Se consideraron 6 tratamientos con 3 réplicas cada uno, es decir, los tratamientos y el control tuvieron cuatro fotobiorreactores en total (Figura 13), la estructura estuvo conformada de la siguiente manera: El tratamiento (T1) estuvo compuesto por 7 ml de *Arthrospira platensis* + 100 % agua del río Chillón con Cromo + 6 días de evaluación. El tratamiento (T2) estuvo compuesto por 7 ml de *A. platensis* + 50 % agua del río Chillón con Cromo / 50 % agua desionizada + 6 días de evaluación. El tratamiento (T3) estuvo conformado por 7 ml de *A. platensis* + 25 % agua del río Chillón con Cromo / 75 % agua desionizada + 6 días de evaluación. El tratamiento (T4) estuvo compuesto por 7 ml de *A. platensis* + 100 % agua del río Chillón con Cromo + 12 días de evaluación. El tratamiento (T5) estuvo conformado por 7 ml de *A. platensis* + 50 % agua del río Chillón con Cromo / 50 % agua desionizada + 12 días de evaluación. El tratamiento (T6) estuvo compuesto por 7 ml de *A. platensis* + 25 % agua del río Chillón con Cromo / 75 % agua desionizada + 12 días de evaluación. Por último, el tratamiento control (T0) estuvo conformado por 7 ml de *A. platensis* + 100 % agua desionizada + 12 días de evaluación (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Tratamientos experimentales*

Tratamiento	Ap + Dosis + Días
T1	7 ml Ap + 100 % ARCC + 6 días
T2	7 ml Ap + 50 % ARCC / 50 % AD + 6 días
T3	7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 6 días
T4	7 ml Ap + 100 % ARCC + 12 días
T5	7 ml Ap + 50 % ARCC / 50 % AD + 12 días
T6	7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 12 días
CONTROL	7 ml Ap + 100 % AD + 12 días

Ap: *Arthrospira platensis*; ARCC: Agua del Río Chillón con Cromo; AD: agua desionizada  
Fuente: Elaboración propia

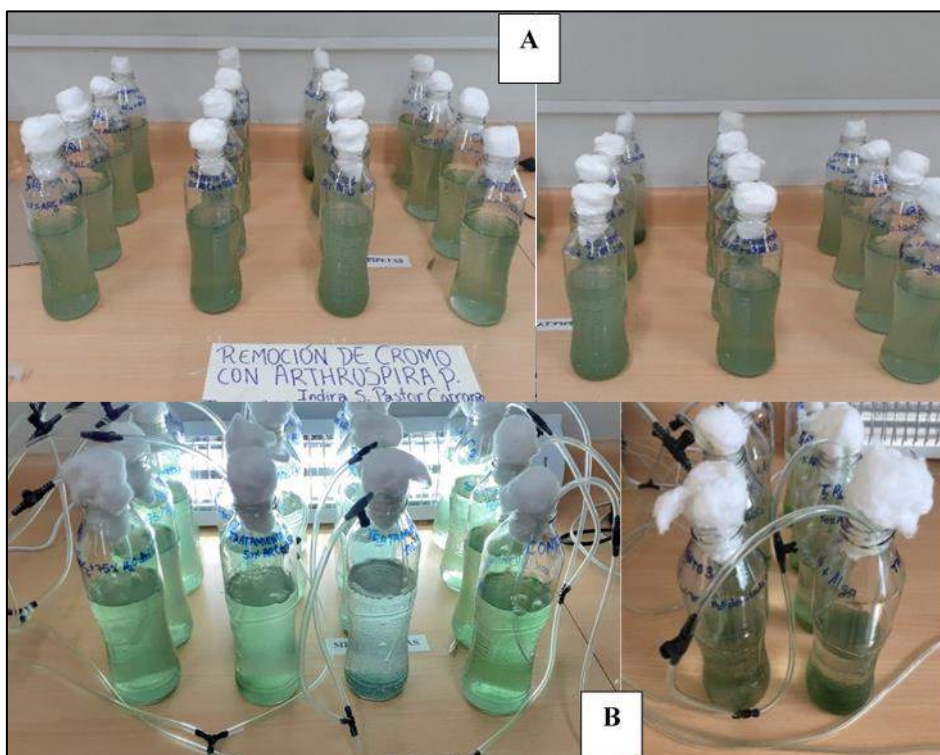


Figura 13. a. Proceso de aplicación de tratamientos. b. Tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

#### 2.1.4. Unidades experimentales

La investigación constó con 28 unidades experimentales incluido el control (cuatro fotobiorreactores por cada tratamiento y control). Cada unidad experimental estuvo compuesta por un fotobiorreactor cerrado de 475 ml de capacidad, al cual se le añadió 7 ml

de *A. platensis* que fue el único componente fijo, se agregó también 300 ml entre agua del río Chillón y agua desionizada dependiendo de cada tratamiento cuyas proporciones fueron las siguientes: 100 % agua del río Chillón, 50 % de agua del río Chillón más 50 % de agua desionizada y 25 % agua del río Chillón más 75 % de agua desionizada (Figura 13).

### 2.1.5. Identificación de las variables y su mensuración

Durante la investigación se realizaron evaluaciones con la finalidad de determinar las variaciones de los parámetros físico-químicos del agua que era objeto de estudio (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Variables y su mensuración*

Variable	Unidades	Mensuración
<i>Independientes</i>		
Biomasa de <i>Arthrospira platensis</i>	mg.L <sup>-1</sup>	Método de extracción alcohólica
Período	Días	Días calendario
Temperatura	Celsius (°C)	Termómetro de mercurio
<i>Dependientes</i>		
Remoción de Cromo	ppm	Fotometría
Remoción de DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup>	Método Winkler
Remoción de Nitrógeno total	ppm	Fotometría
Remoción de Fósforo total	ppm	Fotometría
pH	Rangos de pH	Potenciometría

*Fuente:* Elaboración propia.

A continuación, se detallan como se determinaron los siguientes parámetros:

### Medición de pH

Para la determinación de este parámetro se empleó el pH-metro o potenciómetro debidamente calibrado, este equipo fue lavado con agua desionizada entre cada medición.



### **Medición de la temperatura**

La temperatura fue medida con termómetro de mercurio. La temperatura fue medida al iniciar y después de la aplicación de los tratamientos al igual que en la caracterización inicial de las muestras.

### **Determinación de nitrógeno total**

El análisis de nitrógeno total se realizó con fotometría con el equipo WTW pHotoFlex® como se muestra en la Figura 14 (ver Apéndice 2); la medición de este parámetro fue efectuada al inicio y final de los tratamientos y los datos obtenidos fueron procesados con la siguiente fórmula:

$$\% \textit{remoción N} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

**C<sub>i</sub>**: Concentración inicial nitrógeno total

**C<sub>f</sub>**: Concentración final nitrógeno total

### **Determinación de fósforo total**

El fósforo total fue analizado con fotometría empleando el equipo WTW pHotoFlex® como se muestra en la Figura 14 (ver Apéndice 3), la medición de este parámetro fue efectuada al inicio y final de los tratamientos y los datos obtenidos fueron procesados con la siguiente fórmula:

$$\% \textit{remoción P} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

**C<sub>i</sub>**: Concentración inicial fósforo total

**C<sub>f</sub>**: Concentración final fósforo total

### **Determinación del porcentaje de remoción de cromo total**

Para el análisis de caracterización inicial y de remoción de cromo de las muestras de agua se empleó la técnica de fotometría con el equipo WTW pHotoFlex® (Figura 14) y los resultados de la caracterización fueron comparados con los estándares nacionales (ver Apéndice 4).

$$\% \text{remoción Cr} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

**C<sub>i</sub>**: Concentración inicial cromo total

**C<sub>f</sub>**: Concentración final cromo total

### **Determinación de plomo**

Para el análisis de plomo durante la caracterización inicial de las muestras de agua y después de la aplicación de tratamientos se usó la técnica de fotometría con el equipo WTW pHotoFlex® (ver Apéndice 5). El plomo fue analizado para ver la presencia de otros metales pesados en las muestras de agua que fueron empleadas para esta investigación y de esta forma ver cuál era la interacción de este elemento respecto a la microalga y la remoción de cromo.



*Figura 14.* Proceso de determinación de Cromo Total, nitrógeno, fósforo y plomo. *Fuente:* Elaboración propia.

### **Determinación de DBO<sub>5</sub>**

Para la determinación de DBO<sub>5</sub> se empleó el método de Winkler. La primera parte de este método consistió en colocar 300 ml de la muestra de agua del río Chillón en un Winkler, luego se agregó 1 ml de Sulfato de Manganeso ( $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ ) y se agitó vigorosamente, seguidamente se adicionó 1 ml de reactivo Alkali yoduro-azida y se agitó vigorosamente, por último, se añadió 1 ml de Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) para liberar el yodo y se agitó vigorosamente para deshacer los gránulos formados (Figura 15).

La segunda parte del método estuvo compuesto por la preparación del almidón para el cual se empleó 50 ml de agua destilada más un gramo de almidón para luego calentarlo a fuego lento mezclándolo constantemente. Después se tomó 50 ml de la solución preparada en la primera parte en un matraz de Erlenmeyer para su titulación, paso seguido se cargó la bureta con tiosulfato de sodio ( $Na_2S_2O_3$ ) colando la bureta en un soporte universal, luego se tomó el matraz Erlenmeyer añadiéndole 10 gotas de almidón y se procedió a titular la muestra con el tiosulfato, observando el cambio de color de amarillo a azul mientras se agitaba la muestra

y esta se tornaba transparente. En cuanto la muestra se volvió translúcida se detuvo la titulación y se procedió a tomar nota del tiosulfato gastado para la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\text{OD mg/L} = \frac{\text{Vg} \times \text{N} \times 8000}{\text{Vm} ((\text{Vf} - 2) / \text{Vf})}$$

Donde:

Vg: Volumen gastado de tiosulfato

N: Sulfato normalidad (tiosulfato de potasio)

Vm: Volumen de la muestra

Vf: Volumen del Winkler

Finalmente, se llevó a incubar la preparación de la primera parte del Winkler añadiéndole 1 ml de inóculo durante 5 días a 20 °C, se realizó el mismo proceso en otro Winkler, pero sin el inóculo. Tras la incubación se realizó nuevamente todo el procedimiento descrito hasta antes de la incubación para determinar el DBO<sub>5</sub> con la siguiente fórmula:

Cuando el agua de disolución no está sembrada:

$$\text{DBO}_5 \text{ mg/L} = \frac{(\text{D}_1 - \text{D}_2)}{P}$$

Donde:

D<sub>1</sub>: Oxígeno disuelto (OD) de la muestra diluida inmediatamente después de su preparación

D<sub>2</sub>: OD de la muestra diluida después de 5 días de incubación a 20 °C

P: Fracción volumétrica decimal de la muestra utilizada

Cuando el agua de disolución está sembrada:

$$\text{DBO}_5 \text{ mg/L} = \frac{(\text{D}_1 - \text{D}_2) - (\text{B}_1 - \text{B}_2)f}{P}$$

Donde:

D<sub>1</sub>: Oxígeno disuelto (OD) de la muestra diluida inmediatamente después de su preparación

D<sub>2</sub>: OD de la muestra diluida después de 5 días de incubación a 20 °C

P: Fracción volumétrica decimal de la muestra utilizada

B<sub>1</sub>: OD del control de simiente antes de la incubación

B<sub>2</sub>: OD del control de la simiente después de la incubación

f: Proporción de la simiente en la muestra diluida con respecto a la del control de simiente  
((% de simiente en la muestra diluida) / (% de simiente en el control de simiente))



Figura 15. Determinación de la OD y DBO<sub>5</sub>. Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.6. Diseño estadístico del experimento

Se aplicó un modelo de diseño completamente al azar (DCA), donde el factor fijo fueron los seis tratamientos planteados (Tabla 2) que fueron enfrentado con las seis variables.

### **2.1.7. Análisis estadístico de datos**

Todos los datos y/o valores obtenidos durante el estudio fueron procesados y analizados en el programa Microsoft Excel 2016 para la interpretación de los resultados a través de gráficos. Asimismo, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) con un  $p < 0,05$  para evaluar las diferencias significativas entre los tratamientos y las variables (conductividad, temperatura, pH, DBO<sub>5</sub>, cromo, fósforo y nitrógeno), además, se ejecutó el análisis Post hoc de Tukey para las variables en el programa SPSS Statistics 22.

## **2.2. Materiales**

### **2.2.1. Material biológico**

- La Microalga *A. platensis* conocida comúnmente como *Spirulina*, fue adquirida de un cultivo axénico procedente de la Universidad Nacional de Piura.

### **2.2.2. Medios de cultivo**

- Medio de cultivo la solución hidropónica de La Molina® A y B modificada adquirido de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

### **2.2.3. Reactivos**

- Sulfato de Manganeso (MnSO<sub>4</sub>.4H<sub>2</sub>O)
- Alkali yoduro-azida, ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- Tiosulfato de sodio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),
- Metanol al 90 %,
- Bicarbonato de sodio
- Agua destilada
- Almidón
- Alcohol de 96 °

#### **2.2.4. Equipos**

- Autoclave marca Kyntel
- Centrífuga para tubos de ensayo Kert Lab modelo 0412 - 1
- Espectrofotómetro marca Kert Lab modelo Spectrum Lab 54
- Fotómetro marca pFotoFlex® Turb
- Aireador BIG – BOY B – 10200
- Vortex mixer marca Kyntel
- Balanza digital electrónica marca Electronic Balance
- Microscopio binocular marca Labor Tech modelo 2005
- Cámara de flujo marca Kyntel
- Baño María marca Kert Lab modelo CDK – S22
- Estufa eléctrica
- Multiparámetro MULTI-3430 (ver Apéndice 17).

#### **2.2.5. Otros materiales**

- Los materiales complementarios utilizados fueron: Frasco de vidrio (3 L), botellas de vidrio (475 ml), paneles LED, manguera de pecera, papel filtro (Rundfilter® de 125 mm), potenciómetro, micropipetas, bureta, asa de siembra, tubos de ensayo, matraz de Erlenmeyer, tips o puntas de pipeta estéril, mechero de alcohol, probeta, cubetas, papel aluminio, placas petri, porta objetos, vasos precipitados, frasco Winkler, pipeta, embudo, guantes y mascarilla.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### 3.1. Obtención de la biomasa inicial de *Arthrospira platensis*

La Figura 16 muestra la tendencia de la curva de crecimiento de *A. platensis* a través de los días, esto como consecuencia del incremento de la concentración de clorofila “a” ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) poniendo en evidencia la buena correlación lineal ( $R^2=0,9909$ ), la cual mostró las excelentes condiciones fisiológicas de la *A. platensis*. Durante este proceso fueron vigiladas todas las etapas de crecimiento, determinándose que la capacidad de carga del cultivo ( $k$ ) fue de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  y la tasa de crecimiento exponencial ( $r$ ) obtuvo un valor de  $0,1175 \text{ días}^{-1}$ , de igual manera el tiempo de duplicidad ( $T_2$ ) tuvo un valor de  $5,899 \text{ días}$  (Tabla 4) (ver Apéndice 7).

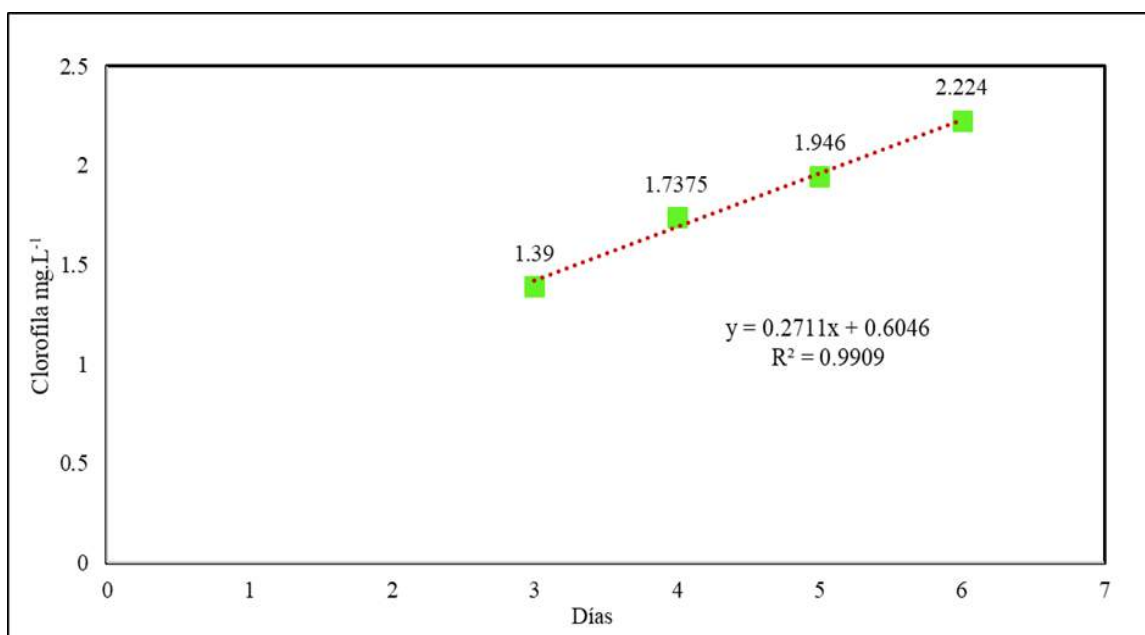


Figura 16. Curva de crecimiento de biomasa de *Arthrospira platensis* fase exponencial.

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 4***Parámetros cinéticos de crecimiento de Arthrospira platensis*

Parámetros cinéticos de <i>Arthrospira platensis</i>	Unidades	Valores
Crecimiento exponencial (r)	días <sup>-1</sup>	0,1175
Capacidad de carga (K)	mg.L <sup>-1</sup>	1
Tiempo de duplicidad (T <sub>2</sub> )	días	5,899

Fuente: Elaboración propia.

La determinación del crecimiento de la biomasa algal de *A. platensis* (conocida como *Spirulina sp.*) mostrada en la Figura 16, permitió hallar la concentración de biomasa que fue utilizada en los tratamientos en base a la investigación de Barroso *et al.* (2019), quienes emplearon biomasa algal viva de *Spirulina sp.* para la remoción de cromo de agua residuales en una proporción de 20 g. L<sup>-1</sup> por cada uno de los biorreactores empleados en su estudio, por lo cual para la presente investigación se realizaron los siguientes cálculos:

Determinación de la concentración de microalgas: fueron extraídos 10 ml del fotobiorreactor de solución madre (*A. platensis* + medio de cultivo) en un tubo de ensayo, el cual fue pesado obteniendo un peso inicial de 20,41 g (peso del tubo de ensayo + medio de cultivo + *A. platensis*) y un peso final después del centrifugado de 11,2960 g (peso del tubo de ensayo + *A. platensis*)

$$20,41 - 11,2960 = 9,114 \text{ g}$$

$$10 \text{ ml} \text{ ————— } 9,114 \text{ g}$$

$$1 \text{ ml} \text{ ————— } \boxed{x = 0,9114 \text{ g} \approx 0,90 \text{ g}}$$

Según Barroso *et al.* (2019) fue calculado lo siguiente:

$$20 \text{ g} \text{ ————— } 1 \text{ L}$$

$$X \text{ g} \text{ ————— } 0,3 \text{ L}$$

$$\boxed{X = 6 \text{ g}}$$

Por último:

$$0,9 \text{ g} \text{ ————— } 1 \text{ ml}$$

$$6 \text{ g} \text{ ————— } \boxed{X \text{ ml} = 6,666666 \approx 7 \text{ ml}}$$

Tras los cálculos realizados fue establecido que cada uno de los fotobiorreactores individuales de los tratamientos planteados para esta investigación debía contener 7 ml de microalga, por tanto, para las 28 unidades experimentales (tratamientos y control) se requirió un total de 196 ml de biomasa algal.

### 3.2. Determinación del efecto de la biomasa de la microalga *Arthrospira platensis* en el porcentaje de la remoción de cromo

La Figura 17 muestra la disminución de biomasa algal (concentración inicial 7 ml) a través de la determinación de la clorofila entre cada uno de los tratamientos a los 6 y 12 días de prueba, siendo la concentración de clorofila más baja hallada a los 12 días en el T4 con  $0,2316 \text{ mg.L}^{-1}$ , sin embargo, la remoción de cromo total para este tratamiento fue la más alta entre todos los tratamientos a los 6 y 12 días con  $88,04 \%$  (Figura 18). La concentración de clorofila final más elevada fue la de T1 a los 6 días con  $0,4401 \text{ mg.L}^{-1}$  pero su porcentaje de remoción de cromo total ( $78 \%$ ) fue el cuarto más eficaz de los tratamientos.

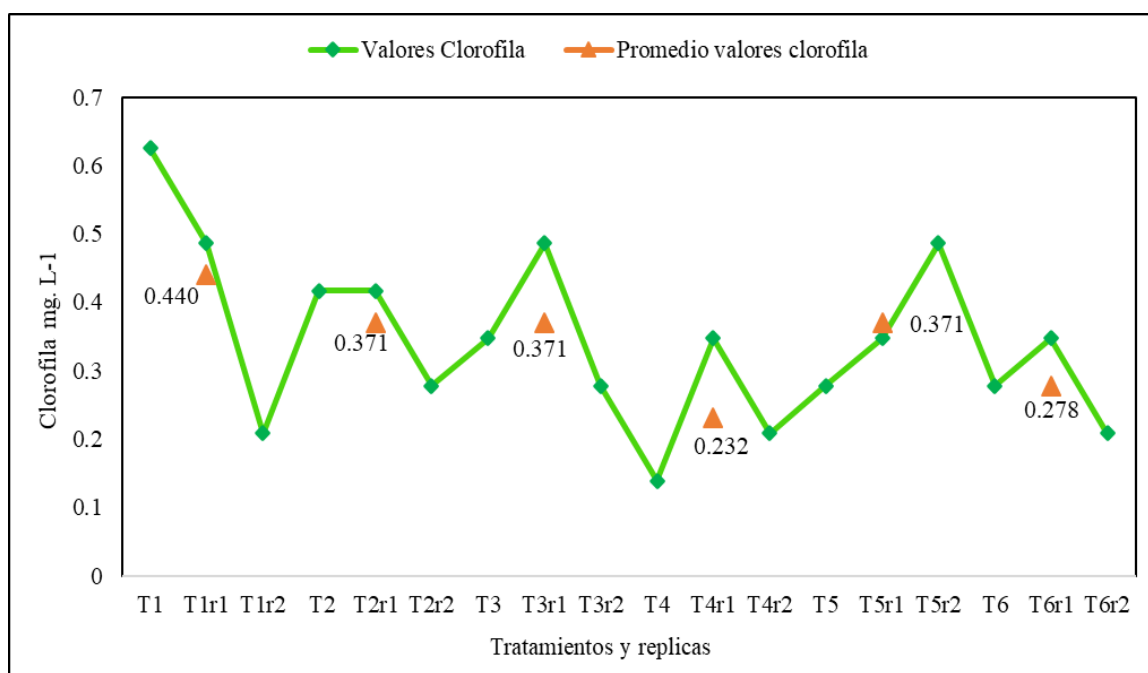


Figura 17. Concentraciones de clorofila final para cada tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la concentración de la clorofila para T2, T3 y T5 fue de  $0,3706 \text{ mg.L}^{-1}$  para cada uno, no obstante, los porcentajes de remoción de cromo total para T2 fue  $59,49 \%$ , para T5 fue  $76,81 \%$  y T3 con  $84,05 \%$  (Figura 18). De igual manera, T6 obtuvo una

concentración de clorofila final de 0,278 mg.L<sup>-1</sup> y tuvo el segundo valor más alto de remoción de cromo total con un porcentaje de 85,5 % (Figura 18).

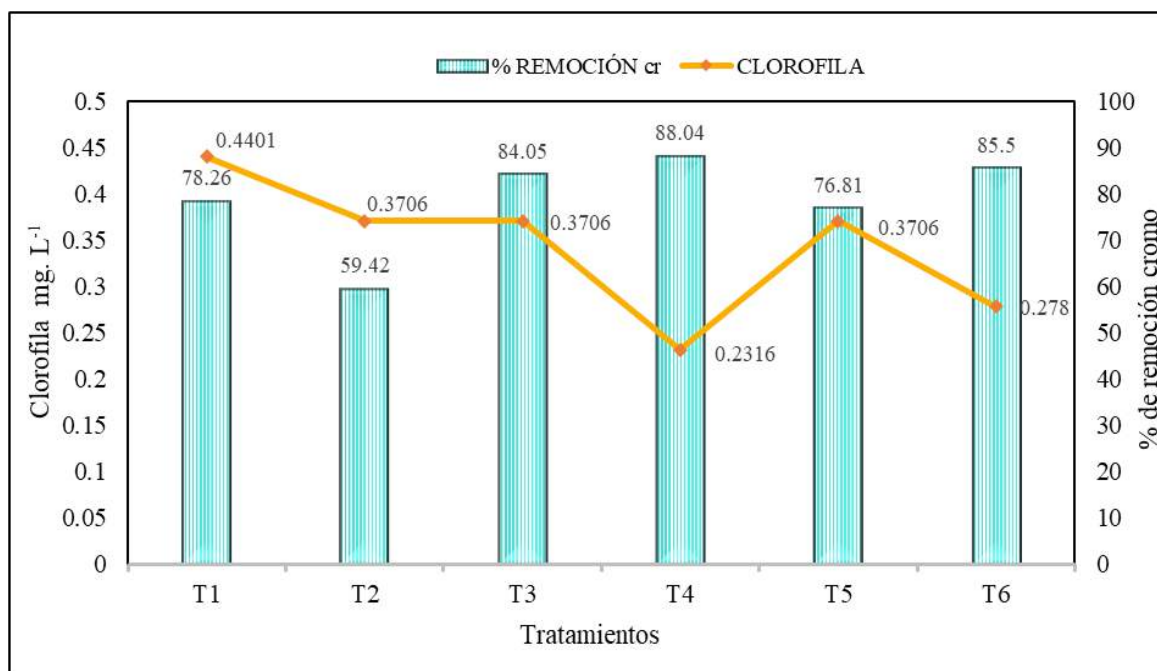


Figura 18. Concentraciones de clorofila final contra remoción de cromo total para cada tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Caracterización fisicoquímica de las muestras de agua superficial provenientes del río Chillón antes y después del tratamiento con la microalga *Arthrospira platensis*.

#### 3.3.1. Antes de los tratamientos con la microalga *Arthrospira platensis*.

Los resultados obtenidos del análisis físico-químico de la muestra de agua inicial del río Chillón se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Parámetros físico-químicos iniciales de la muestra de agua del río Chillón*

Parámetros	Unidades	Resultado	ECA para agua (2017) <sup>1</sup>	Cumplimiento de ECA
Conductividad	mS. cm <sup>-1</sup>	1,51	1,0 mS. cm <sup>-1</sup>	No
Temperatura	°C	18	Δ3 <sup>2</sup>	Si
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidades de pH	6,7	6,5 – 9,0	Si
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg.L <sup>-1</sup>	37,56	10 mg.L <sup>-1</sup>	No
Cromo total	mg.L <sup>-1</sup>	0,23	0,011 mg.L <sup>-1</sup>	No
Fósforo Total	mg.L <sup>-1</sup>	0,36	0,05 mg.L <sup>-1</sup>	No
Nitrógeno Total	mg.L <sup>-1</sup>	3,92	(Nitrato 13 mg.L <sup>-1</sup> + Amoníaco Total 1,54 mg.L <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	Si
Plomo	mg.L <sup>-1</sup>	0,29	0,0025 mg.L <sup>-1</sup>	No

<sup>1</sup> Decreto Supremo 004-2017-MINAM, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, E2: Ríos: Costa y Sierra

<sup>2</sup> Δ3: Significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

<sup>3</sup> La categoría no cuenta con el parámetro de nitrógeno Total, por lo cual se sumó nitratos + amoníaco total que son el equivalente a nitrógeno total.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados obtenidos, se evidenció que de los ocho parámetros medidos, cinco no cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua categoría 4: conservación del ambiente acuático, E2: Costa y Sierra (ver Apéndice 8) dado que el DBO<sub>5</sub> presentó un valor de 37,56 mg.L<sup>-1</sup> excediendo los 10 mg.L<sup>-1</sup> establecidos en la norma; la

conductividad arrojó un valor de 1,51 mS. cm<sup>-1</sup> superando el 1,0 mS. cm<sup>-1</sup> de la norma; el cromo total obtenido de la muestra fue de 0,23 mg.L<sup>-1</sup> sobrepasando el 0,011 mg.L<sup>-1</sup> que señala la norma; el fósforo total alcanzado fue 0,36 frente a 0,05 mg.L<sup>-1</sup> de la norma, por último, fue medida la concentración de plomo mediante fotometría (photoflex) para evidenciar la presencia de otro metal pesado en las muestras de agua con un valor de 0,29 mg.L<sup>-1</sup> mismo que superó los 0,0025 mg.L<sup>-1</sup> considerado en la norma.

### **3.3.2. Después de los tratamientos con la microalga *Arthrospira platensis*.**

En la Tabla 6 se aprecian los resultados del análisis físico-químico al que fueron sometidas las muestras de agua del río Chillón una vez tratadas con la microalga *A. platensis* bajo condiciones de laboratorio para los 6 y 12 días.

**Tabla 6**

Valores de los parámetros obtenidos del análisis físico-químico de las muestras de agua del río Chillón tratadas con la microalga *Arthrospira platensis* a los 6 (T1, T2 Y T3) y 12 (T4, T5 Y T6) días de tratamiento

Parámetros	Control	T1 <sup>1</sup>	T2 <sup>2</sup>	T3 <sup>3</sup>	T4 <sup>4</sup>	T5 <sup>5</sup>	T6 <sup>6</sup>	Cumplimiento de ECA para agua
Conductividad	0,71	1,7	1,3	1,3	1,78	1,37	1,33	No
	0,72	1,72	1,31	1,2	1,89	1,24	1,17	
	0,71	1,76	1,31	1,21	1,87	1,35	1,24	
	0,71	1,72	1,4	1,22	1,86	1,35	1,33	
Promedio	0,71 ± 0,005	1,72 ± 0,03	1,30 ± 0,005	1,23 ± 0,05	1,84 ± 0,05	1,32 ± 0,07	1,24 ± 0,08	
Temperatura	21,1	22	22,2	22,1	22,1	22,1	22,2	Sí
	21	22,1	22,1	22,2	22,2	22,1	22,1	
	21,8	22,2	22,1	22,1	22,1	22,2	22,1	
	21,8	22,2	22,1	22,1	22,1	22,3	22,1	
Promedio	21,30 ± 0,43	22,10 ± 0,10	22,13 ± 0,05	22,13 ± 0,05	22,13 ± 0,05	22,13 ± 0,05	22,13 ± 0,05	
Potencial de Hidrógeno (pH)	7,9	8,2	8	8,1	8	8,1	8,2	Sí
	7,9	8,2	8	8	8,1	7,9	8,2	
	8,2	8,1	8	8,1	8	8,2	8,1	
	7,9	8,2	8	8,1	8	8	8,2	
Promedio	7,90 ± 0	8,16 ± 0,05	8,00 ± 0	8,06 ± 0,05	8,03 ± 0,05	8,06 ± 0,15	8,16 ± 0,05	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	75,12	75,12	80,49	85,85	80,49	85,85	85,85	No
	73,11	75,12	79,45	85,85	80,49	85,85	84,85	
	75,12	74,13	80,48	83,88	80,45	83,86	85,85	
	75,12	75,12	80,48	85,85	80,49	85,85	85,85	
	74,45 ± 1,16	74,79 ± 0,57	80,14 ± 0,59	85,20 ± 1,13	80,47 ± 0,02	85,19 ± 1,14	85,52 ± 0,57	
*	-99,11	-113,35	-126,82	-114,23	-126,8	-127,67		

<sup>1</sup> 7 ml Ap + 100 % ARCC + 6 días

<sup>2</sup> 7 ml Ap + 50 % ARCC / 50 % AD + 6 días

<sup>3</sup> 7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 6 días

<sup>4</sup> 7 ml Ap + 100 % ARCC + 12 días

<sup>5</sup> 7 ml Ap + 50 % ARCC / 50 % AD + 12 días

<sup>6</sup> 7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 12 días

Valores de los parámetros obtenidos del análisis físico-químico de las muestras de agua del río Chillón tratadas con la microalga *Arthrospira platensis* a los 6 (T1, T2 Y T3) y 12 (T4, T5 Y T6) días de tratamiento (Continuación).

Parámetros	Control	T1 <sup>7</sup>	T2 <sup>8</sup>	T3 <sup>9</sup>	T4 <sup>10</sup>	T5 <sup>11</sup>	T6 <sup>12</sup>	Cumplimiento de ECA para agua
Cromo total	0	0,02	0,11	0,04	0	0,06	0,04	Sí
	0	0,04	0,08	0,03	0,02	0,05	0,02	
	0	0,09	0,09	0,04	0,06	0,05	0,04	
	0	0,02	0,08	0,03	0	0,05	0,02	
Promedio	0 ± 0	0,05 ± 0,03	0,09 ± 0,01	0,03 ± 0,005	0,02 ± 0,03	0,05 ± 0,005	0,03 ± 0,01	
Remoción (%)	*	78,26%	59,42%	84,05%	88,04%	76,81%	85,50%	
Fósforo	2,71	1,09	2,49	3,03	0,87	2,24	2,98	No
	2,82	1,03	2,45	3,01	1,08	2,15	3,3	
	2,8	1,23	2,72	3,03	1,4	2,2	3	
	2,71	1,03	2,45	3,01	0,87	2,15	3	
Promedio	2,77 ± 0,05	1,11 ± 0,10	2,55 ± 0,14	3,02 ± 0,01	1,11 ± 0,26	2,19 ± 0,04	3,09 ± 0,17	
Remoción (%)	*	-208,33	-608,33	-738,89	-208,33	-508,33	-758,33	
Nitrógeno	1,57	14,69	10,45	10,2	13,01	8,97	9,45	Si
	1,6	14,47	12,83	8,55	11,33	9,76	7,13	
	1,7	14,57	10,55	9	10,81	9	7,3	
	1,6	14,47	10,45	8,55	10,81	8,97	7,3	
Promedio	1,62 ± 0,06	14,57 ± 0,11	11,27 ± 1,34	9,25 ± 0,85	11,71 ± 1,14	9,24 ± 0,44	7,29 ± 1,29	
Remoción (%)	*	-271,68	-187,50	-135,97	-198,72	-135,71	-85,97	

Fuente: Elaboración propia.

<sup>7</sup> 7 ml Ap + 100 % ARCC + 6 días

<sup>8</sup> 7 ml Ap + 50 % ARCC / 50 % AD + 6 días

<sup>9</sup> 7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 6 días

<sup>10</sup> 7 ml Ap + 100 % ARCC + 12 días

<sup>11</sup> 7 ml Ap + 50 % ARCC / 50 % AD + 12 días

<sup>12</sup> 7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 12 días

### a) Variación de la conductividad

La conductividad como se muestra en la Figura 19 en los dos periodos de tiempo de 6 y 12 días mostró sus valores más alto en los T1 y T4 con  $1,72 \pm 0,03$  y  $1,84 \pm 0,05$  mS.  $\text{cm}^{-1}$  respectivamente y los más bajo en T3 y T6 con  $1,23 \pm 0,05$  y  $1,24 \pm 0,08$  mS/cm frente al control el cual tuvo un valor de  $0,71 \pm 0,005$  mS.  $\text{cm}^{-1}$ . Esto pudo deberse a la diferencia de la composición de los tratamientos descritos como sigue T1 (7 ml Ap + 100 % ARCC + 6 días) y T4 (7 ml Ap + 100 % ARCC + 12 días); mientras que el T3 (7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 6 días) y T6 (7 ml Ap + 25 % ARCC / 75 % AD + 12 días) respectivamente, por lo tanto, al realizar el contraste del ECA Categoría 4: Conservación del ambiente acuático E2: Ríos: Costa y Sierra cuyo valor es 1,0 mS.  $\text{cm}^{-1}$  y los resultados obtenidos podemos afirmar que estos incumplen el valor establecido en dicha norma.

El análisis de variancia (ANOVA) para un factor fijo (tratamientos) muestra diferencias significativas entre la conductividad y los tratamientos, dado que el valor de significancia obtenido fue de 0,000 siendo este menor al p valor establecido de 0,05; además, el valor de F de 152,621 confirma la relación de las variables (ver Apéndice 9).

El análisis Post hoc de comparaciones múltiples de la prueba de rango múltiple de Tukey para la conductividad frente a tratamientos evidenció que la clasificación de los grupos se dividieron en tres subconjuntos: el subconjunto 1, dentro del cual se encuentra únicamente el control que difiere del resto; el subconjunto 2 donde están comprendidos los tratamientos 3, 6, 2 y 5 cuyas medias no difieren significativamente ( $p= 0,472$ ) y en el subconjunto 3 se encuentran los tratamientos 1 y 4 estadísticamente no significativos con un  $p = 0,135$  (ver Apéndice 10).



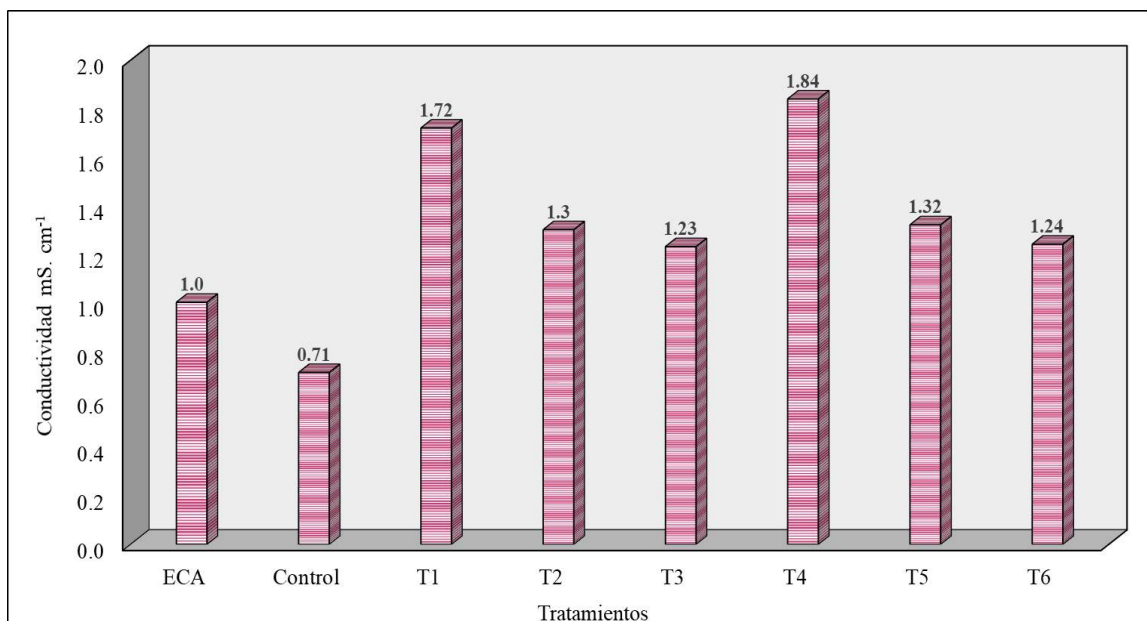


Figura 19. Variación de la conductividad a los 6 y 12 días. Fuente: Elaboración propia.

## b) Variación de la temperatura

La variación de la temperatura en el presente estudio tuvo un rango de variación de 0,83 ° C, como se muestra en los resultados de la medición de la temperatura durante la experimentación como se aprecia en la Tabla 6.

El ANOVA para un factor fijo (tratamientos) muestra diferencias significativas entre los tratamientos y la temperatura con un valor de significancia de 0,000 siendo este menor al valor establecido ( $p = 0,05$ ) para la prueba, también el valor F fue de 9,503 demostrando las diferencias estadísticamente significativas, pero en menor cantidad entre las medias de la variable dependiente (ver Apéndice 9).

La prueba de rango múltiple de Tukey para la temperatura versus los tratamientos generó como resultado 2 subconjuntos, el subconjunto 1 exhibe solo al control cuya media no difiere significativamente (1,000), y en el subconjunto 2 se aprecia la clasificación basada en el grado de parecido existente entre las medias de los tratamientos (T1, T2, T3, T4, T5 y T6) dando como resultado un p valor de 1,000 siendo estadísticamente no significativo (ver Apéndice 11).

### c) Variación del potencial de hidrógeno (pH)

La Tabla 7 muestra las variaciones de pH durante la aplicación de los tratamientos, mostrando el rango de pH en el que se desarrolló la *A. platensis*, teniendo una ligera tendencia a un estado alcalino en T1 y T6 con un valor de 8,16 para ambos seguido de T3 y T5 con valores de 8,06 para cada uno y finalmente T2 y T4 que fueron los más bajo con 8 y 8,03 respectivamente; por ende, se afirma que los resultados obtenidos durante el estudio están dentro del rango de pH aprobado en el ECA, mismo que propone un rango de 6,5 – 9,0 para la categoría 4.

El ANOVA para un factor fijo (tratamientos) señala las diferencias significativas entre los tratamientos y el potencial de hidrógeno (pH) dado que el valor de significancia es menor a 0,05 con un valor de  $p = 0,006$ , asimismo, el valor de F fue 5,030 indicando que la variable dependiente está relacionada con la variable independiente (tratamientos) pero en menor magnitud (ver Apéndice 9).

La prueba de rango múltiple de Tukey en cuanto al pH contra los tratamientos comprobó que no existen diferencias significativas para los tratamientos encontrados en el subconjunto 1 (Control, T2, T4, T5 y T3) ya que el valor de significación para este subconjunto fue de 0,139 el cual fue mayor a la significancia establecida de 0,05; de igual manera, el subconjunto 2 en el cual se encuentran T2, T4, T5, T3, T1 y T6 arrojó un valor de 0,139 de significancia siendo homogéneos y por tanto estadísticamente no significativos (ver Apéndice 12).

**Tabla 7***Variación de pH a los 6 y 12 en la aplicación de tratamientos*

Tratamientos	pH
ECA	6,5 - 9,0
Control	7,9
T1	8,16
T2	8
T3	8,06
T4	8,03
T5	8,06
T6	8,16

*Fuente:* Elaboración propia**d) Variación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

La variación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) tuvo un incremento a lo largo del desarrollo del estudio, iniciando con un valor de 37,56 mg.L<sup>-1</sup> de DBO<sub>5</sub> para la caracterización fisicoquímico inicial de las muestras antes de la aplicación de los tratamientos como se aprecia en la Tabla 5. Los resultados después de la aplicación de los tratamientos a los 6 y 12 días de prueba, exhibieron que T6, T3 y T5 tuvieron los valores más altos de DBO<sub>5</sub> con 85,52, 85,2 y 85,19 mg. L<sup>-1</sup> (Figura 20) respectivamente, en comparación a T1 que presentó el valor más bajo con 74,49 mg. L<sup>-1</sup>. Los valores obtenidos en esta investigación fueron superiores en comparación con el valor de 10 mg. L<sup>-1</sup> estipulado en el ECA para agua categoría 4, evidenciando el incumplimiento de este parámetro.

El ANOVA para un factor fijo (tratamientos) señala las diferencias significativas entre los tratamientos y la DBO<sub>5</sub> puesto que el valor de significancia fue de 0,000 siendo menor al valor establecido de  $p = 0,05$ . El valor F fue de 97,011, el cual representa mayor relación entre las variables (ver Apéndice 9).

En cuanto al DBO<sub>5</sub> versus los tratamientos la prueba de rango múltiple de Tukey reflejó que no existen diferencias significativas en cada uno de los subconjuntos; el subconjunto 1 conformado por el control y T1, el subconjunto 2 conformado por T2 y T4 y el subconjunto 3 conformado por T5, T3 y T6 para esta prueba los 3 subconjuntos generados tuvieron el mismo valor de significancia de 0,999 (ver Apéndice 13).

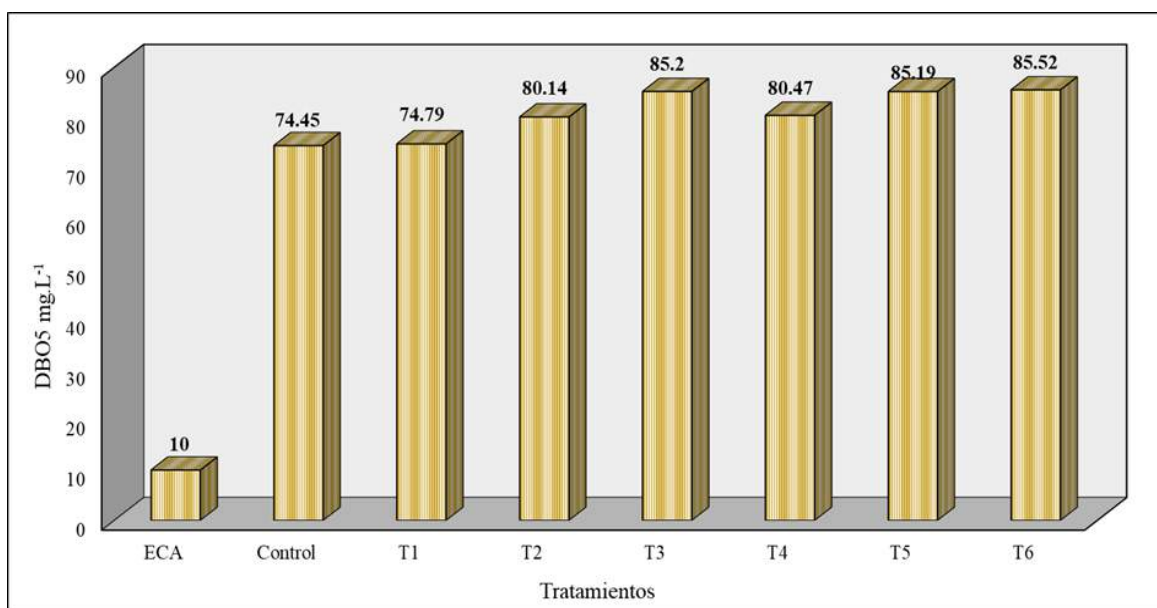


Figura 20. Variación de la DBO<sub>5</sub> a los 6 y 12 días. Fuente: Elaboración propia.

#### e) Variación de cromo total

La caracterización inicial de cromo total que fue realizada a las muestras de agua antes de la aplicación de los tratamientos arrojó un valor de 0,23 mg.L<sup>-1</sup> superando al ECA de agua categoría 4, norma que establece como valor máximo permitido hasta 0,011 mg.L<sup>-1</sup> de cromo total en un cuerpo receptor. Tras la aplicación de los tratamientos a 6 y 12 días, los resultados evidenciaron una reducción máxima de hasta 88,04 % ( 0,02 ± 0,03 mg.L<sup>-1</sup>) para T4 seguida de un 85,5 % (0,03 ± 0,01 mg.L<sup>-1</sup>) y 84,05 % (0,03 ± 0,005 mg.L<sup>-1</sup>) para T6 y T3 respectivamente y una mínima reducción para T2 con 59,42 % (0,09 ± 0,01 mg.L<sup>-1</sup>), demostrando así la eficacia de la *A. platensis* para la remoción de cromo total disminuyendo los valores de concentración de este metal pesado y llegando a cumplir el ECA de agua para la categoría 4 (Figura 21).

El ANOVA para un factor fijo (tratamientos) señala las diferencias significativas entre los tratamientos y el cromo total reflejado en un valor de significancia de 0,002 y un valor F de 6,471, éste último expresa un reducido grado de afinidad entre la variable dependiente (cromo total) y la variable independiente (tratamientos) (ver Apéndice 9).

En cuanto al cromo total frente a los tratamientos la prueba de rango múltiple de Tukey formó 2 subconjuntos, el subconjunto 1 con T4, T6, T3, T1 y T5 con un valor de significancia

de 0,056 revelando que los valores son homogéneos y no presentaron diferencias significativas; de igual manera para T1, T5 y T2 ubicados en el subconjunto 2 que no presentaron diferencias estadísticamente significativas con un valor de  $p=0,164$  (ver Apéndice 14).

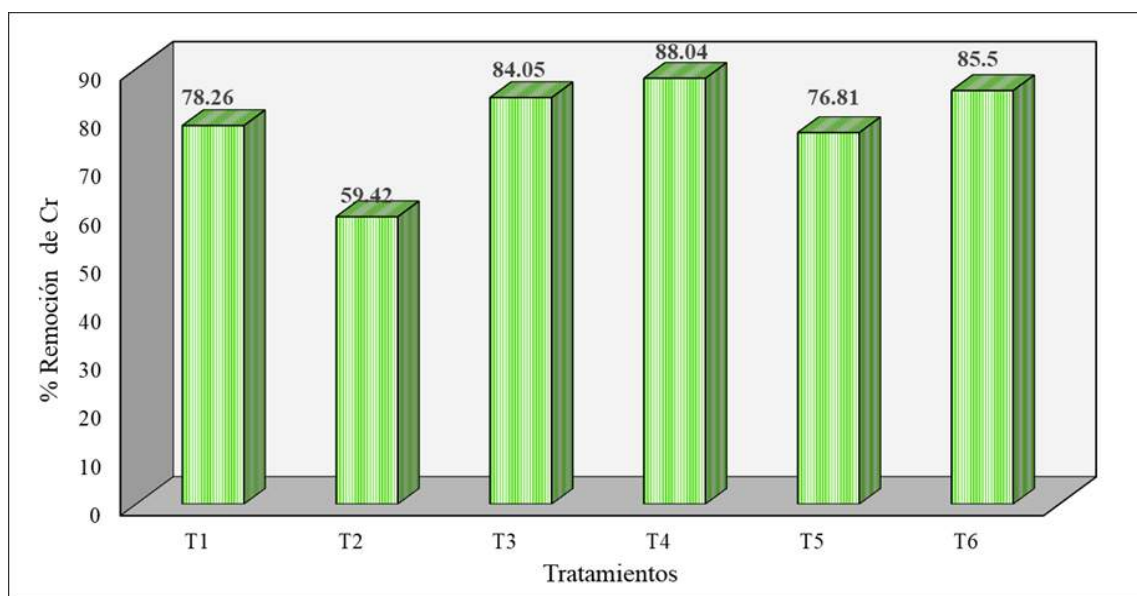


Figura 21. Variación de la remoción de cromo total a los 6 y 12 días. Fuente: Elaboración propia.

#### f) Variación de fósforo total

El valor obtenido de la caracterización fisicoquímica inicial de las muestras de agua sin tratamientos fue de  $0,36 \text{ mg. L}^{-1}$ , mostrando que el valor de fósforo total después de los tratamientos tuvo un incremento hasta un valor máximo de  $3,09 \pm 0,17 \text{ mg. L}^{-1}$  en T6, seguido de un  $3,02 \pm 0,01 \text{ mg. L}^{-1}$  en T3 y un mínimo de  $1,11 \pm 0,10 \text{ mg. L}^{-1}$ ,  $1,11 \pm 0,26 \text{ mg. L}^{-1}$  para T1 y T4 respectivamente (Figura 22). Tanto el valor inicial como los valores postratamiento no cumplieron con el ECA para agua categoría 4, mismo que establece como valor máximo admitido  $0,05 \text{ mg. L}^{-1}$ .

El ANOVA para un factor fijo (tratamientos) establece las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y el fósforo total con un valor de significancia de 0,000 el cual es menor al  $p = 0,05$  dispuesto para el estudio. Exhibiendo que las medias de la variable dependiente (fósforo total) difieren más entre los grupos de la variable independiente (tratamiento) con un valor de 105,649 para F (ver Apéndice 9).

La prueba de rango múltiple de Tukey para fósforo total versus los tratamientos dio como resultado 4 subconjuntos; en el subconjunto 1 se encuentran comprendidos T1 y T4 con un  $p = 1,0$ ; dentro del subconjunto 2 encontramos a T5 y T2 con un valor de  $p = 0,90$ , en el subconjunto 3 se hallan el control y T3 con una significancia de  $0,494$  y, por último T3, T6 y el control en el subconjunto 4 con un valor de  $p = 0,160$ , dejando en evidencia que todos los grupos de los subconjuntos son homogéneos y no existe una diferencia estadística significativa (ver Apéndice 15).

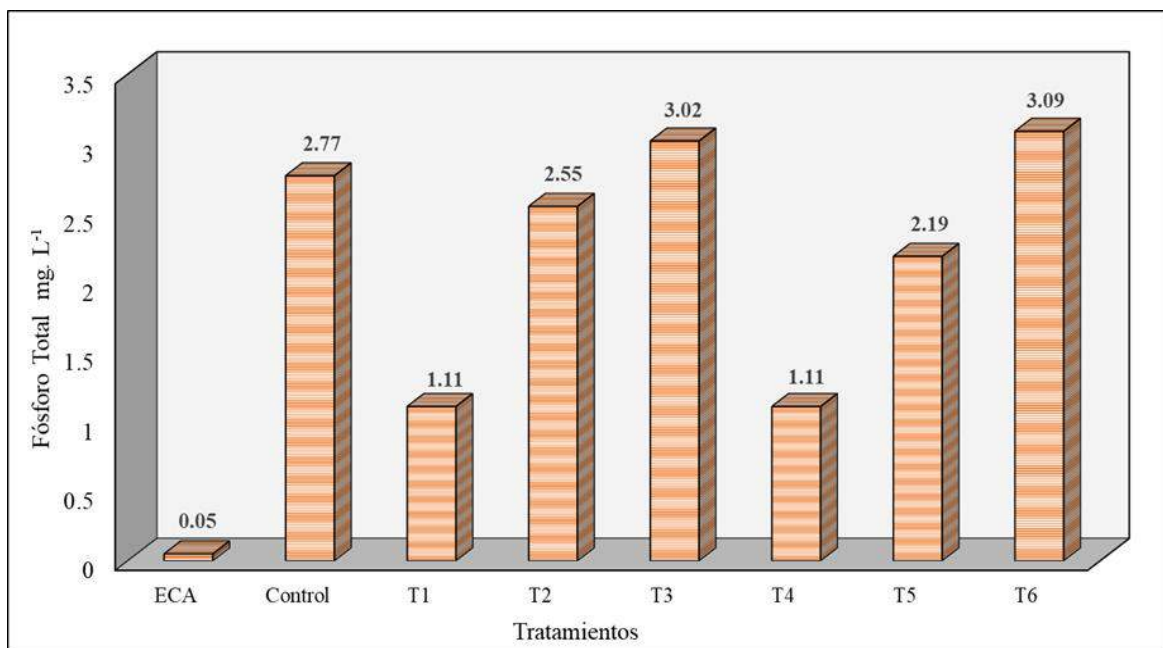


Figura 22. Variación fósforo total a los 6 y 12 días. Fuente: Elaboración propia.

#### g) Variación de nitrógeno total

La variación del nitrógeno total tuvo un valor inicial de  $3,92 \text{ mg. L}^{-1}$  como se observa en la Tabla 5. La Figura 23 evidencia el incremento del nitrógeno total con unos valores máximos en T1 ( $14,57 \pm 0,11 \text{ mg. L}^{-1}$ ), T4 ( $11,71 \pm 1,14 \text{ mg. L}^{-1}$ ) y T2 ( $11,27 \pm 1,34 \text{ mg.L}^{-1}$ ) y un valor mínimo en T6 ( $7,29 \pm 1,29 \text{ mg. L}^{-1}$ ) (Figura 23). Por lo tanto, el valor inicial, así como los resultados obtenidos tras la aplicación de los tratamientos con la *A. platensis* sí cumplieron con el valor máximo permitido por el ECA para agua en la categoría 4, puesto que esta categoría no cuenta con el ítem de nitrógeno total, se realizó la suma de nitrato  $13 \text{ mg. L}^{-1}$  más amonio total  $1,54 \text{ mg. L}^{-1}$  que es el equivalente a nitrógeno total.

El ANOVA para un factor fijo (tratamientos) demuestra las diferencias estadísticamente significativas entre el nitrógeno total y los tratamientos con un valor de significancia de 0,000, siendo este menor al  $p(0,05)$  establecido para el estudio. El F de 59,810 el cual denota que las medias de la variable dependiente (nitrógeno total) difieren entre los grupos de la variable independiente (tratamiento) (ver Apéndice 9).

En cuanto a la prueba de rango múltiple de Tukey para nitrógeno total frente a los tratamientos generó 4 subconjuntos, el subconjunto 1 cuyo único grupo es el control con un  $p = 1,000$ , el subconjunto 2 con tres grupos (T6, T5 y T3) y un  $p = 0,602$ , el subconjunto 3 con 4 grupos (T5, T3, T2 y T4) y una significancia de 0,057 y finalmente el subconjunto 4 con T1 y un  $p = 1,000$  (ver Apéndice 16).

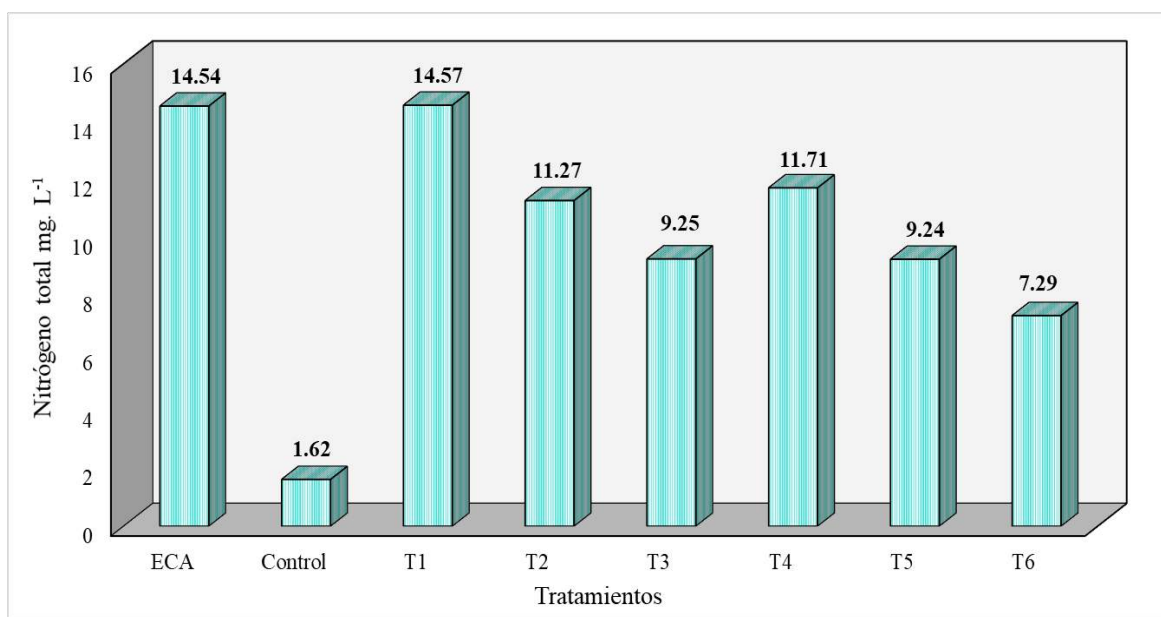


Figura 23. Variación nitrógeno total a los 6 y 12 días. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Estimación del efecto de los periodos de exposición de la microalga *Arthrospira platensis* en el porcentaje de remoción de cromo presente en las muestras de agua de río Chillón

En la Figura 18 se observan los resultados tras la aplicación de los tratamientos los cuales mostraron que T4 realizó la mayor remoción de cromo total con 88,04 % ( $0,02 \pm 0,03$  mg. L<sup>-1</sup>) a los 12 días de prueba con una concentración final de biomasa algal de 0,2316 mg.L<sup>-1</sup>; mientras que T2 realizó el menor porcentaje de remoción de cromo total con 59,49 % ( $0,09 \pm 0,01$  mg.L<sup>-1</sup>) con una concentración de biomasa final de 0,3706 mg.L<sup>-1</sup> a los 6 días de prueba.

El efecto de los periodos de exposición de la microalga *A. platensis* en el porcentaje de remoción de cromo total a los **6 días** se aprecia en la Figura 18, la cual refleja lo siguiente: T3 tuvo una remoción de hasta 84,05 % ( $0,03 \pm 0,005$  mg.L<sup>-1</sup>) con una concentración de biomasa algal final de 0,3706 mg.L<sup>-1</sup> siendo el máximo valor de remoción, seguido de T1 con un 78,26 % ( $0,05 \pm 0,03$  mg.L<sup>-1</sup>) con una concentración de biomasa final de 0,4401 mg.L<sup>-1</sup> esta última es la concentración de clorofila más alta entre todos los tratamientos a los 6 y 12 días de prueba, por último T2 con 59,49 % ( $0,09 \pm 0,01$  mg.L<sup>-1</sup>) es el tratamiento con menor remoción de cromo total a los 6 días con una concentración de biomasa final de 0,3706 mg.L<sup>-1</sup>.

El efecto de los periodos de exposición de la microalga *A. platensis* en el porcentaje de remoción de cromo total a los **12 días** como se ve en la Figura 18 evidencia a T4 con 88,04 % ( $0,02 \pm 0,03$  mg. L<sup>-1</sup>) con una concentración de biomasa final de 0,2316 mg. L<sup>-1</sup> siendo está la concentración de clorofila más baja entre todos los tratamientos a los 6 y 12 días. Asimismo, T6 con 85,5 % ( $0,03 \pm 0,01$  mg. L<sup>-1</sup>) con una concentración de biomasa final de 0,278 mg. L<sup>-1</sup>, por último, T5 con 76.81 % ( $0,05 \pm 0,005$  mg. L<sup>-1</sup>) con una concentración de biomasa final de 0,3706 mg. L<sup>-1</sup> es la remoción más baja entre los tratamientos para los 12 días.



## CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

### 4.1. Obtención de biomasa de *Arthrospira platensis*

La biomasa de *A. platensis* de esta investigación fue producida en un fotobiorreactor madre con solución hidropónica de La Molina® modificada como medio de cultivo obteniendo como resultado una tasa de crecimiento exponencial ( $r$ ) de  $0,1175 \text{ días}^{-1}$ ; estos resultados son semejantes a los reportados por Sánchez (2014) que mostró en su investigación una tasa de crecimiento de *A. platensis* de  $0,153 \text{ días}^{-1}$ , utilizando como medio de cultivo Fast Biol T20 a una concentración de  $0,5 \text{ ml.L}^{-1}$  y como fuente de iluminación energía eléctrica. Mientras que Sánchez (2018) obtuvo como resultado de su estudio una tasa de crecimiento de  $0,3744 \pm 0,005 \text{ días}^{-1}$  en un medio de cultivo de agua residual hidropónica y un panel solar como fuente de iluminación. La diferencia de la tasa de crecimiento puede deberse al tipo de sistema de iluminación y/o medio de cultivo nutritivo que se use, como lo demuestran Huarachi *et al.* (2015a) en su investigación empleando un fotobiorreactor tubular cónico con medio de cultivo de solución hidropónica La Molina® y  $11\ 700 \text{ lux}$  de fuente de iluminación, generando una tasa de crecimiento de  $0,298 \text{ g.m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  de biomasa. De igual manera Vásquez-Villalobos *et al.* (2014) indicaron en su estudio que con un medio de cultivo Zarrouk y aplicación de luz Led con una emisión de  $3\ 000 \text{ lux}$  alcanzaron una tasa de crecimiento microalgal de  $0,40 \text{ días}^{-1}$ . Finalmente, se evidencia que el medio de cultivo de solución hidropónica es un medio apropiado para el crecimiento de la *A. platensis* como lo demuestra la tasa de crecimiento de la presente investigación y de los estudios mencionados.

#### 4.2. Efecto de la biomasa de *Arthrospira platensis* en el porcentaje de remoción de cromo

En cuanto al efecto de la biomasa de *A. platensis* sobre el porcentaje de remoción de cromo, los resultados alcanzados para este estudio, mostraron que a la concentración de clorofila más baja ( $0,2316 \text{ mg.L}^{-1}$ ) en T4 consiguió un 88,04 % de remoción de cromo, sin embargo, a la concentración más alta de clorofila de  $0,4401 \text{ mg.L}^{-1}$  en T1 el porcentaje de remoción de cromo fue de 78,26 %, siendo el cuarto porcentaje de remoción más alto de los tratamientos planteados para esta investigación. Los porcentajes de remoción obtenidos para este estudio se mantuvieron durante los 6 y 12 días de evaluación. Por el contrario, Dal Magro *et al.* (2013) reportaron que a mayor concentración de biomasa de *S. platensis* (*A. platensis*.), el porcentaje de remoción de cromo fue mayor con valores de 61,94 % y 58,41 % para T6 y T8 respectivamente, los cuales estuvieron compuestos de la siguiente forma: T6 ( $150 \text{ mg.L}^{-1}$  de cromo +  $3,5 \text{ g.L}^{-1}$  de *S. platensis* Leb-52+ 3 de pH) y T8 ( $150 \text{ mg.L}^{-1}$  de cromo +  $3,5 \text{ g.L}^{-1}$  de *S. platensis* Leb-52+ 3 de pH).

Asimismo, Finocchio *et al.* (2010) en su estudio, probaron diferentes concentraciones de biomasa de *S. platensis* en distintas concentraciones de cromo para demostrar la capacidad biosorbente de la microalga; las concentraciones de biomasa empleadas fueron de  $1,0 \text{ g.L}^{-1}$ ,  $2,0 \text{ g.L}^{-1}$  y  $4,0 \text{ g.L}^{-1}$  y las concentraciones de cromo iban de 8,0 hasta  $50,0 \text{ mg.L}^{-1}$ . Tras la aplicación de las pruebas obtuvieron una eficacia de eliminación de cromo superior a 80 % a concentraciones elevadas de solución de cromo ( $18,0$  y  $25,0 \text{ mg.L}^{-1}$ ) con  $2,0$  y  $4,0 \text{ g.L}^{-1}$  de biomasa de *S. platensis*. En otras palabras, Dal Magro *et al.* (2013) y Finocchio *et al.* (2010) manifiestan que a mayor concentración de biomasa de *A. platensis* el porcentaje de biosorción de cromo será mayor, pero que tras la saturación del metabolismo de la microalga los porcentajes de remoción del metal se ven comprometidos debido a la desorción de cromo al medio tratado.

Por otro lado, la reducción de la concentración de biomasa o clorofila en los fotobiorreactores de los tratamientos para esta investigación podría deberse inicialmente al incremento de nitrógeno total, es decir, el alto contenido nitrógeno puede tener un efecto tóxico en el crecimiento de biomasa o cultivos microalgales como lo han reportado

Abeliovich y Azov (1976). Otro de los factores que se relaciona con la concentración de biomasa es el DBO<sub>5</sub>, ya que una elevada DBO<sub>5</sub> involucra la disminución de oxígeno disuelto del agua pudiendo ocasionar anaerobiosis y la muerte progresiva del alga (Abdel *et al.*, 2012). De la misma forma, el pH del medio también afecta a todos los procesos relacionados con el crecimiento de la microalga y su funcionamiento metabólico (Alvear *et al.*, 2011); se sabe que la *A. platensis* se desarrolla mejor en un ambiente con pH alcalino entre 9 y 11 (Cuesta y Serrano, 2006), por ello la producción de biomasa pudo verse afectada en la presente investigación ya que el rango del pH se mantuvo entre 7,90 y 8,16.

Finalmente, la concentración de biomasa de *A. platensis* pudo haberse reducido debido a que la temperatura obtenida en los tratamientos fue de 22 °C y según Gonzáles *et al.* (1995) la concentración de biomasa aumenta de manera considerable a rangos de temperatura de 35 a 38 °C.

#### **4.3. Caracterización fisicoquímica de las muestras de agua antes y después del tratamiento con *Arthrospira platensis***

##### **Variación del potencial de hidrógeno (pH)**

El pH en el análisis de varianza presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), siendo el máximo valor de 8,16 para T1 y T6 con un porcentaje de remoción de cromo de 78,26 % y 85,5% respectivamente; por otro lado, el valor más bajo de pH fue 8 en el T4 con una remoción de 88,04 % de cromo. Los valores de pH y remociones son similares a los reportados por Colla *et al.* (2015) que realizaron un estudio del potencial de *S. platensis* (*A. platensis*) viva sobre la biosorción de Cr<sup>6+</sup> y su conversión en Cr<sup>3+</sup>, fundamentando que a un pH 9 la microalga logro eliminar hasta el 65,2 % de Cr<sup>6+</sup> y convirtió 90,42 % a Cr<sup>3+</sup> en el medio de cultivo y solo el 9,6 % fue retenido por la biomasa.

Por otra parte, Dal Magro *et al.* (2013) observaron la capacidad biosorbente de la *S. platensis* en su estudio, mostrando la capacidad de la microalga para remover metales pesados, dado que consiguió remociones de cromo superiores con valores de 61,97 %, 60,09 % y 57,75 % al valor de pH más bajo que estudiaron siendo este de 5. Asimismo, Gokhale *et al.* (2009)

evaluaron la biosorción de cromo con biomasa seca de *S. platensis*, en condiciones experimentales controladas con un pH de 1,5, 30 °C de temperatura y 180 revoluciones por minuto (rpm), dando como resultado un 99 % de remoción del metal de una solución acuosa con 100 mg. L<sup>-1</sup> de cromo.

Los resultados de los autores citados al igual que los obtenidos por la presente investigación hacen notar la relación del pH con los porcentajes de remoción de cromo y su interacción con la *A. platensis*. Esta relación se puede explicar considerando la disminución o aumento del pH; la disminución del pH provoca que los grupos funcionales como el carbonilo y la amina suministren superficies celulares cargadas positivamente favoreciendo la biosorción de metales de tipo aniónico (Kuyucak y Volesky, 1988). Por otro lado, Blázquez *et al.* (2005) mencionan que a valores de pH por encima de 5 la capacidad de biosorción se ve afectada por la formación de complejos metálicos hidratados y cambios electrostáticos en la superficie de las algas.

### **Variación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

En cuanto al DBO<sub>5</sub> la caracterización primaria de las muestras de agua del río Chillón tuvieron un valor inicial de 37,56 mg.L<sup>-1</sup>. Los valores de DBO<sub>5</sub> de los tratamientos mostraron en el análisis de varianza diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en ambos periodos de evaluación (6 y 12 días), donde T6, T3 y T5 presentaron los valores más elevados con 85,52, 85,2 y 85,19 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, en comparación a T1 que presentó el valor más bajo con 74,49 mg.L<sup>-1</sup>. Estos resultados son diferentes a los conseguidos por Moscoso (2019) en su estudio de biorremediación de efluentes de curtiembre utilizando microalgas *A. dimorphus* y *A. platensis*, los cuales indican que la *A. platensis* removió un 52 % de DBO<sub>5</sub>, 51 % de demanda química de oxígeno (DQO) y 33 % de cromo total. El análisis del estudio señaló que la *A. platensis* tiene mayor capacidad de remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO en contraste a *A. dimorphus*.

De la misma forma, Gonzáles (2018) evaluó la eficacia de un biofiltro a base de *S. platensis* (*A. platensis*) para tratar aguas residuales, logrando disminuir el valor inicial de 27 mg. L<sup>-1</sup> de DBO<sub>5</sub> a 2 mg.L<sup>-1</sup>, cumpliendo así el valor establecido por los estándares de calidad

ambiental de agua, categoría 3 del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. La reducción de la DBO<sub>5</sub> fue por acción de la microalga, ya que esta empleó la materia orgánica presente en el agua residual como alimento.

El aumento de DBO<sub>5</sub> en la presente investigación podría deberse a la muerte de la microalga *A. platensis* elevando la concentración de materia orgánica en el medio; en otras palabras, una elevada DBO<sub>5</sub> involucra la disminución de oxígeno disuelto del agua, propiciando un proceso de anaerobiosis y la muerte progresiva de la microalga que a su vez incrementa la carga orgánica saturando el medio, por ende, disminuyendo la capacidad de procesamiento de materia orgánica por la biomasa viva existente (Abdel *et al.*, 2012).

### **Variación de cromo total**

El cromo total tuvo un valor inicial de 0,23 mg.L<sup>-1</sup>. Los valores del cromo total de los tratamientos con *A. platensis* presentaron en el análisis de varianza diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en ambos periodos de evaluación (6 y 12 días) como lo demuestran los resultados, siendo la remoción máxima de 88,04 % ( $0,02 \pm 0,03$  mg.L<sup>-1</sup>) para T4, seguida de un 85,5 % ( $0,03 \pm 0,01$  mg.L<sup>-1</sup>) y 84,05 % ( $0,03 \pm 0,005$  mg.L<sup>-1</sup>) para T6 y T3 respectivamente; y una remoción mínima de 59,42 % ( $0,09 \pm 0,01$  mg.L<sup>-1</sup>) para T2. Al igual que Colla *et al.* (2015) que en su investigación del potencial de *S. platensis* (*A. platensis*) viva sobre la biosorción de Cr<sup>6+</sup> y su conversión en Cr<sup>3+</sup>; la microalga logró la eliminación de hasta el 65,2 % de Cr<sup>6+</sup> y convirtió 90,42 % a Cr<sup>3+</sup> en el medio de cultivo.

Asimismo, Rezaei (2016) estudió la biosorción de cromo mediante el uso de *S. platensis*, empleando concentraciones de cromo de 10, 50 y 100 mg.L<sup>-1</sup> y una concentración de biomasa de 0,1 g; obteniendo por resultados porcentajes de remoción del metal de 82,52 %, 69,12 % y 59,57 % para concentraciones de 10, 50 y 100 mg.L<sup>-1</sup> de cromo respectivamente, demostrando que la microalga *S. platensis* actúa eficientemente como biosorbente del metal en un medio acuoso. Igualmente, Dal Magro *et al.* (2013) evaluaron la capacidad biosorbente de la microalga *S. platensis* para la biosorción de cromo, consiguiendo remociones de 61,97 %, 60,09 % y 57,75 %, quedando demostrada la capacidad que la microalga tiene para remover este metal de los medios acuosos. Así también, Moscoso (2019) realizó la

biorremediación de aguas residuales de curtiembres empleando dos especies de microalgas, la *A. platensis* y la *A. dimorphus*, alcanzando una remoción del 33 % de cromo total con la *A. platensis* y 75 % con la *A. dimorphus*. Sin embargo, solo la *A. dimorphus* logró reducir el cromo a valores dentro de los límites máximos permisibles (LMP), mientras que los resultados de remoción de cromo para el presente estudio sí cumplen con los estándares de calidad ambiental (ECA) para aguas categoría 4.

### **Variación de fósforo total**

El análisis de fósforo total de la muestra inicial de agua presentó un valor de  $0,36 \text{ mg.L}^{-1}$ . En los tratamientos experimentales los valores de contenido de fósforo total revelaron en el análisis de varianza diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), el valor máximo lo obtuvo T6 con  $3,09 \pm 0,17 \text{ mg.L}^{-1}$  y un valor mínimo de  $1,11 \pm 0,10 \text{ mg.L}^{-1}$  para T1. A diferencia de Villota *et al.* (2018) quienes emplearon tres especies de microalgas, *Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris* para la biorremediación de eutrofización de la laguna de Ubaque, dando como resultados de esa investigación una remoción de fósforo de 84 % para *S. platensis* y más del 90 % de eliminación de fósforo para *S. máxima* y *C. vulgaris*. Asimismo, Mezzomo *et al.* (2010) utilizaron *S. platensis* en la biorremediación de aguas residuales consiguiendo como resultado la eliminación del 41,6 % de fósforo evidenciando la eficacia de la microalga para la eliminación de fósforo.

No obstante, el incremento de fósforo para la presente investigación podría ser explicado por la disminución de *A. platensis*, dado que el fósforo es uno de los macronutrientes que esta microalga emplea como nutriente para producir biomasa (García *et al.*, 2015). De igual manera, el pH también se relaciona con la formación de compuestos derivados del fósforo por lo cual su absorción por las microalgas disminuye en ambientes ácidos y alcalinos, esto último disminuye la biodisponibilidad y propicia la eliminación de fosfatos en un intervalo de pH entre 9 y 11 (Cai *et al.*, 2013).

### **Variación de nitrógeno total**

El valor de nitrógeno total evaluado en la muestra inicial de agua fue de  $3,92 \text{ mg.L}^{-1}$ . Los resultados de esta variable en el análisis de varianza muestran diferencias significativas ( $p <$

0,05), con un máximo valor de  $14,57 \pm 0,11 \text{ mg.L}^{-1}$  en T1 y un mínimo de  $7,29 \pm 1,29 \text{ mg.L}^{-1}$  en T6. Por el contrario, Villota *et al.* (2018) con el objetivo de reducir los niveles de nitritos y nitratos emplearon tres especies de microalgas, *S. máxima*, *S. platensis* y *C. vulgaris*, obteniendo como resultados para la remoción de nitritos un 87,2 % con *C. vulgaris*, 82 % con *S. máxima*, 82 % con *S. platensis* y para la remoción de nitratos un 88,24 % con *C. vulgaris*, 85,9 % con *S. máxima* y 64 % con *S. platensis*.

El incremento de la concentración de nitrógeno total es posible que esté relacionado a la saturación o ausencia de la asimilación de nitrato y/o amonio por la *A. platensis*, esto debido a que la microalga usa estos elementos como suministros de nitrógeno (Morot-Gaudry, 2001), la segunda razón de dicho incremento es explicado por el proceso biológico que se desarrolla en los cultivos de microalgas o algas, este tipo de sistemas son fuentes de emisión de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso N<sub>2</sub>O probado por autores como Harter *et al.* (2013) o Ferrón *et al.* (2012) que han cuantificado los flujos de N<sub>2</sub>O desde el agua a la atmósfera y son estos mismos gases que en la presente investigación no habrían liberado adecuadamente. Finalmente, el incremento de nitrógeno total correspondería a la disminución de biomasa en cada uno de los birreactores de los tratamientos.

#### **4.4. Efecto de los periodos de exposición de *Arthrospira platensis* en el porcentaje de remoción de cromo presente en las muestras de agua**

En la presente investigación se plantearon dos periodos de evaluación de 6 y 12 días correspondientemente con una concentración inicial de 7 ml de *A. platensis*. Durante el primer periodo de 6 días de evaluación T3 obtuvo el mayor porcentaje de remoción de cromo con un valor de 84,05 % y T2 logró un porcentaje de remoción de 59,42 % siendo este el más bajo para el periodo indicado. El segundo periodo de 12 días de experimentación dio como resultado el mayor porcentaje de remoción de cromo en T4 con un 88,04 % y el menor porcentaje de remoción en T5 con 76,81 % de cromo removido respectivamente. Por el contrario, Dal Magro *et al.* (2013) revelaron en su estudio que los mayores porcentajes de eliminación de cromo se dieron en sus tratamientos (T1, T2 y T9) con 61,97 %, 60,09 % y 57,75 % en ese orden, en un periodo de evaluación de una hora. Según Dal Magro *et al.* (2013) los mejores resultados de la primera hora de evaluación se justifican como

consecuencia de la prevalencia de enlaces físicos y químicos entre el metal y la biomasa de *S. platensis*.

De igual manera, Barroso *et al.* (2019) en su investigación aplicaron 20 g.L<sup>-1</sup> de biomasa viva de *S. platensis* y 6 g.L<sup>-1</sup> de biomasa muerta de *S. platensis* a agua residual industrial (ARI) y agua residual industrial sedimentada (ARIS) contaminadas con cromo, evaluadas en dos periodos de 24 y 96 horas respectivamente. Tras la experimentación se logró la remoción del 96,50 % a las 24 horas y 48,48 % a las 96 horas para ARI; mientras que, para ARIS se consiguió la biosorción del metal en un 12 % a las 24 h y 8 % a las 96 h. Comprobando que la eficacia de eliminación es superior en las primeras 24 h ya que a las 96 horas la biosorción se revierte, es decir, existe un proceso de desorción pasada las 24 h como consecuencia de que las microalgas retuvieron las sustancias necesarias para su metabolismo y excretaron el excedente.

Finalmente, para la presente investigación los porcentajes de remoción en ambos periodos de evaluación si fueron significativos y a diferencia de Dal Magro *et al.* (2013) y Barroso *et al.* (2019), esto podría deberse a que además de los enlaces físicos iniciales generados en el primer periodo de evaluación se formaron también enlaces químicos entre el metal y la microalga (microorganismo biosorbente) estableciendo fuertes vínculos y reduciendo la posibilidad de que se produzca un proceso de desorción de cromo adherido a la biomasa en el medio (Gokhale *et al.*, 2009).



## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Al término de la presente investigación se concluyó que la microalga *A. platensis* tiene la capacidad de biorremediar el cromo presente en las aguas del río Chillón; ya que *A. platensis* demostró tener una alta afinidad con el cromo bioacumulándolo casi en su totalidad.
2. Se logró obtener la concentración de biomasa de *A. platensis* adecuada para desempeñar este estudio; durante el proceso de obtención de biomasa se determinó también la capacidad de carga del cultivo ( $k$ ) que fue de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  y la tasa de crecimiento exponencial ( $r$ ) con un valor de 0,1175, de igual manera el tiempo de duplicidad ( $T_2$ ) con un valor de 5,899 días, concluyendo que la obtención de biomasa fue óptima para llevar a cabo los tratamientos planteados.
3. Se consiguió determinar el efecto que produce la biomasa de la *A. platensis* sobre el porcentaje de remoción de cromo de las muestras de agua del río Chillón, ya que este estudio evidenció que la concentración de biomasa no está relacionada directamente con el porcentaje de remoción de cromo, quedando demostrado en los resultados de T4 a los 12 días, el cual logró la mayor remoción de cromo de 88,04 % con la concentración más baja de clorofila que fue de  $0,2316 \text{ mg.L}^{-1}$ . Asimismo, T1 a los 6 días tuvo la mayor concentración de clorofila con  $0,4401 \text{ mg.L}^{-1}$  pero fue el cuarto más eficaz al remover el cromo con un porcentaje de 78,26 %.
4. Los resultados para la caracterización inicial de las muestras de agua del río Chillón evidenciaron que cinco de los ocho parámetros medidos no cumplieron con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua categoría 4: conservación del ambiente acuático, E2: Costa y Sierra. Tras la aplicación de los tratamientos con la *A. platensis* los resultados de la caracterización fisicoquímica mostraron que solo tres de los parámetros evaluados (conductividad, fósforo total y  $\text{DBO}_5$ ) no cumplieron con la norma antes mencionada.

5. De la estimación respecto al efecto de los periodos de exposición de la *A. platensis* sobre el porcentaje de remoción se concluyó que durante el primer periodo de experimentación se formó una conexión física entre el metal y la biomasa algal permitiendo una absorción y remoción de cromo con valores considerablemente elevados, algo semejante ocurre con los resultados del segundo periodo de evaluación ya que con el transcurrir de los días la capacidad de biosorción y remoción de cromo aumentó gradualmente siendo los resultados de este segundo periodo más altos en comparación con los del primero.

## CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio con diferentes valores de pH para corroborar el pH ideal en el cual la microalga *A. platensis* logra porcentajes más altos de eliminación de metales pesados.
2. Evaluar los periodos o tiempo en el cual la *A. platensis* satura su metabolismo de metales pesados en un medio acuoso y la posibilidad de un proceso de desorción de los mismos.
3. Efectuar una investigación para evaluar cuan efectiva es la *A. platensis* para la biorremediación de procesos de eutrofización o reducción de nitrógeno y fósforo totales.
4. Realizar una investigación evaluando la capacidad biorremediadora de la *A. platensis* en un sistema diferente de los fotobiorreactores cerrados.
5. Ejecutar estudios de prueba de biosorción a diferentes concentraciones de metales pesados y diferentes concentraciones de biomasa de *A. platensis*.
6. Realizar estudios comparativos de capacidad de biorremoción entre la *A. platensis* y *A. máxima*. Asimismo, un estudio comparativo entre los medios de cultivo Zarrouk y Solución Hidropónica.

## REFERENCIAS

- Abdel-Rouf, N., Al-Homaidan, A. y Ibraheem, I. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257-275. [doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005)
- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, P., Torres, E. y Herreo., C. (1995). *Microalgas: Cultivo y Aplicaciones*. A Coruña: Universidade, Servizo de Publicacions. [doi.org/10.17979/spudc.9788497497695](https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497695)
- Agency for Toxic Substances and disease Registry (ATSDR) (2006). *Chromium Toxicity. Case Studies in Environmental Medicine*. Course: SS3048 U.S
- Ahmad, A., Ghufran, R., y Wahid, Z. (2010). Metals Cd, As, Cu, and Zn transfer through dry to rehydrated biomass of *Spirulina Platensis* from wastewater. *Polish Journal Environ Studies*, 19(5), 674-682. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Anwar\\_Ahmad4/publication/261570532\\_Metals\\_Cd\\_As\\_Cu\\_and\\_Zn\\_Transfer\\_through\\_Dry\\_to\\_Rehydrated\\_Biomass\\_of\\_Spirulina\\_Platensis\\_from\\_Wastewater/links/0a85e534ba1a2bbe20000000/Metals-Cd-As-Cu-and-Zn-Transfer-through-Dry-to-Rehydrated-Biomass-of-Spirulina-Platensis-from-Wastewater.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Anwar_Ahmad4/publication/261570532_Metals_Cd_As_Cu_and_Zn_Transfer_through_Dry_to_Rehydrated_Biomass_of_Spirulina_Platensis_from_Wastewater/links/0a85e534ba1a2bbe20000000/Metals-Cd-As-Cu-and-Zn-Transfer-through-Dry-to-Rehydrated-Biomass-of-Spirulina-Platensis-from-Wastewater.pdf)
- Abeliovich, A. y Azov, Y. (1976). Toxicity of ammonia to algae in sewage oxidation ponds. *Applied and environmental microbiology*, 31(6), 801-806.
- Alminagorta, E. (2018). *Evaluación de bioacumulación de metales pesados en el pez bagre (Rhamdia quelen) en el río Urubamba del Centro Poblado de Uritúyocc en el Distrito de Marcas*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/2436/TEISIS-2018-ING.%20AGROINDUSTRIAL-ALMINAGORTA%20MARTINEZ.pdf?sequence=1>
- Alvear, M., Castillo, C., Henao, D., y Tejada, L. (2011). *Evaluación del PH y concentración de Nitrógeno en el cultivo de las microalgas Dunaliella salina y Chlorella nativa como fuente de aceite vegetal para la producción del biodiesel*. (Tesis Doctoral). Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/121/Tesis%20Unicar tagena.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Araie, H., Iwamoto, K., y Shiraiwa, Y. (2009). Aquatic bioremediation by metal accumulation of microalgae. *Phycologia*, 48, 120.

- Araujo, L. (2016). *Bioadsorción de cromo con borra de café en efluentes de una industria curtiembre local*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica Del Perú, Lima, Perú. Recuperado de [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6727/LAGOS\\_L\\_ESLY\\_BIOADSORCION\\_CROMO\\_CAFE\\_CURTIEMBRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6727/LAGOS_L_ESLY_BIOADSORCION_CROMO_CAFE_CURTIEMBRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Arnous, M. y Hassan, M. (2015). Heavy metals risk assessment in water and bottom sediments of the eastern part of Lake Manzala, Egypt, based on remote sensing and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10), 7899-7918.
- Autoridad Nacional del Agua (2016). Protocolo Nacional de la Calidad en Cuerpos Naturales de Agua Superficial. Lima.
- Azov, Y. (1982). Effect of pH on inorganic carbon uptake in algal culture. *Applied and environmental microbiology*, 43(6),1300-1306.
- Baltz, R., Demian, A., y Davies, J. (2010). *Manual of industrial microbiology and biotechnology*. (3th ed.). Editorial American Society for Microbiology Press.
- Barroso, Y., Mantilla, P., y Pérez, J. (2019). Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa *Spirulina sp*, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 10(1), 141-152. Recuperado de <https://doi.org/10.22490/21456453.2326>
- Becker, E. y Venkataram, L. (1982). Biotechnology and exploitation of algae the Indian Approach. GTZ. *Agency for Technical Cooperation*.
- Belay, A. (2002). The potential application of *Spirulina (Arthrospira)* as a nutritional and therapeutic supplement in health management. *Journal of the American Nutraceutical Association*, 5, 27-48.
- Bolan, N., kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Kumpiene, J., Park, J., Makino, T., Kirkham, M. y Schecker, K. (2014). Remediation of heavy metaloides contaminated soils-to mobilize or to immobilize. *Journal of hazardous materials*,266, 141-166. [doi:10.1016/j.jhazmat.2013.12.018](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018)
- Bustíos, C., Martina, M., y Arroyo, R. (2013). Deterioro de la calidad ambiental y la salud en el Perú actual. *Revista peruana de Epidemiologia*, 17(1), 1-9.

- Blázquez, G., Hernáinz, B., Calero, M., y Ruíz-Núñez, L. (2005). Removal of cadmium ions with olive stones: the effect of some parameters. *Process biochemistry*, 40(8), 2649-2654. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.11.007>
- Cai, T., Park, S., y Li, Y. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 360-369.
- Carbonell, M. y Tamayo, J. (2018). *Influencia de la iluminancia y tiempo de remoción de materia orgánica, expresada en DBO<sub>5</sub>, de efluentes de remojo en curtiembres, utilizando Chlorella pyrenoidosa en un fotobiorreactor a escala laboratorio*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú. Recuperado de [http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11439/CarbonellMunoz\\_J%20-%20TamayoJara\\_K.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11439/CarbonellMunoz_J%20-%20TamayoJara_K.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Colla, L., Dal'Magro, C., De Rossi, A., Thomé, A., Reinehr, C., Bertolin, T., y Costa, J. A. (2015). Potential of live *Spirulina platensis* on biosorption of hexavalent chromium and its conversion to trivalent chromium. *International journal of phytoremediation*, 17(9), 861-868. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.964846>
- Covarrubias, S., García, J., y Peña, J. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25(3), 40-45. Recuperado de <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/1810>
- Cuberos, E., Rodríguez, A., y Prieto, E. (2009). Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de salud pública*, 11, 278-289. Recuperado de <https://www.scielosp.org/article/rsap/2009.v11n2/278-289/>
- Cuesta, A., y Serrano, F. (2006). *Evaluación del pH en el cultivo de Spirulina sp. (Arthrospira) bajo condiciones de laboratorio*. (Tesis de grado). Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis261.pdf>
- Chamorro, G., y Salazar-Jacobo, M. (1995). Toxicología de la *Spirulina*. *Tecnología de alimentos*, 30, 13-14.
- Chamorro, G., Salazar, M., Favila, L., y Bourges, H. (1996). Farmacología y toxicología del alga *Spirulina*. Resumen. *Revista de Investigación Clínica*, 48, 389-399. Recuperado de <http://aeh.com.mx/articulos/9.pdf>

- Chamorro, G., Salazar, M., Gomes de Lima, K., Pereira dos Santos, C., Ceballos, G., y Fabila, L. (2002). Actualización en la farmacología de *Spirulina (Arthrospira)*, un alimento no convencional. *Archivos Latinoamericanos de nutrición*, 52(3), 232-240.
- Chekroun, K., Sánchez, E., y Baghour, M. (2014). The role of algae in bioremediation of organic pollutants. *Journal Issues ISSN*, 2360, 8803. Recuperado de <https://journalissues.org/wp-content/uploads/2014/07/Chekourn-et-al.pdf>
- Chen, C., Yeh, K., Aisyah, R., Lee, D. y Chang, J. (2011). Cultivation, photobioreactor desing and harvesting of microalgae for biodiesel production: A *Critical Review*. *Bioresource technology* 102: 71 – 81.
- Dal Magro, C., Deon, M., Rossi, A., Reinehr, C., Hemkemeier, M., y Colla, L. (2012). Chromium (VI) biosorption and removal of chemical oxygen demand by *Spirulina platensis* from wastewater-supplemented culture medium. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(12), 1818-1824. [doi:10.1080/10934529.2012.689539](https://doi.org/10.1080/10934529.2012.689539)
- Dal Magro, C., Deon, M., Thomé, A., Piccin, J., y Colla, L. (2013). Biossorção passiva de cromo (VI) a través da microalga *Spirulina platensis*. *Química Nova*, 36(8), 1139-1145. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422013000800011>
- Dzionic, A., Wojcieszynska, D., y Guzik, U. (2016). Natural carriers in bioremediation: A review. *Electronic Journal Biotechnology*, 19(5), 28-36. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.003>.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias. Diario Oficial El Peruano. pp. 10-19. (2017, julio 07).
- Emsley, J. (2001). *Nature's building blocks: An A-Z guide to elements*. (1st ed.). Editorial Oxford University press.
- Ferrón, S., Ho, D., Johnson, Z., y Huntley, M. (2012). Air-Water Fluxes of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> during Microalgae (*Staurosira* sp.) Cultivation in an Open Raceway Pond. *Environmental Science & Technology*, 46, 10842-10848.
- Finocchio, E., Lodi, A., Solisio, C., y Convertí, A. (2010). Chromium (VI) removal by methylated of *Spirulina platensis*: the effect of methylation process. *Chemical Engineering journal*, 16 (2), 264-269.

- García-Gozalbes, C., Arbib, Z., y Perales-Vargas-Machuca, J. (2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 49-68. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222015000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100003&lng=es&tlng=es).
- Garbisu, C., Amézaga, I., y Alkorta, I. (2002). Biorremediación y Ecología. *Revista Ecosistemas*, 11(3). Recuperado de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/591/558>
- Gokhale, S., Jyoti, K., y Lele, S. (2009). Modeling of chromium (VI) biosorption by immobilized *Spirulina platensis* in packed column. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 735-743. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.005>
- González, C. (2018). *Eficacia de un biofiltro a base de la microalga Spirulina sp. para el tratamiento de las aguas residuales, 2016*. (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/34566>
- González, M., Parra, O., y Cifuentes, A. (1995). Técnicas de cultivo de microalgas en laboratorio. *Manual de métodos ficológicos*, 219-250.
- Guiry, M., y Guiry, G. (2013). World-wide electronic publication. *Revista Algaebase*. Recuperado de <http://www.algaebase.org>
- Greenwell, H., Laurens, L., Shieldes, R., Lovitt, R., y Flynn, K. (2009). Placing microalgae on the biofuel's priority list: a review of the technological challenges. *Journal of the royal society interface*, 7(46), 703-26. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20031983>
- Harter, T., Bossier, P., Verreth, J., Bodé, S., Van Der Ha, D., Debeer A., Boon, N., Boeckx, P., Vyverman, W., y Nevejan, N. (2013). Carbon and Nitrogen Mass Balance during Flue Gas Treatment with *Dunaliella salina* Cultures. *Journal of Applied Phycology*, 25, 359-368.
- Hema, T., Getha, K., Tan, G., Sahira, H., Syamil, A., y Fairuz, M. (2014). Actinobacterial isolates from tin tailings and forest soil for bioremediation of heavy metals. *Journal of tropical forest science*, 26, 153-162. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/23617024>
- Hernández-Pérez, A., y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>



Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. (5ta ed.). Editorial McGraw-Hill.

Huarachi-Olivera, R., Yapo-Pari, U., Dueñas-Gonza, A., González-Juárez, R., Condoria-Huamanga, J., Pacheco-Salazar, D., y Soto-Flores, J. (2015a). Adaptabilidad de *Spirulina (Arthrospira) platensis (Cyanophyta)* en fotobiorreactor tubular cónico bajo condiciones ambientales. *Idesia (Arica)*, 33(1), 103-112. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000100011>

Huarachi- Olivera, R., Yapo-Pari, U., Dueñas-Gonza, A., Gonzalez-Juárez, R., Condoria-Huamanga, J., Pacheco-Salazar, D., y Soto-Flores, J. (2015b). Cultivo de *Arthrospira platensis (Spirulina)* en fotobiorreactor tubular doblemente curvado a condiciones ambientales en el sur del Perú. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(1), 142-149. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.50679>

Hughes, B., Neale, C., Ward, C. y Lederberg, J. (2000). *Biorremediación en: Enciclopedia de Microbiología*. Editorial Academic  
Pres.[https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=fhC\\_nz8eHh0C&oi=fnd&pg=PP2&ots=FQZ0204kXV&sig=xI5mtRE5DV02K72-7pDZQhRyc&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=fhC_nz8eHh0C&oi=fnd&pg=PP2&ots=FQZ0204kXV&sig=xI5mtRE5DV02K72-7pDZQhRyc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Instituto Geográfico Nacional (2006). Cartografía de la cuenca baja del río Chillón.

Jiang, W. y Fan, W. (2008). Bioremediation of heavy metal - contaminated soils by sulfate-reducing bacteria. *Annals of the New York Academy of Science*, 1140(1), 446 - 454. Recuperado de <https://doi.org/10.1196/annals.1454.050>

Kaplan, D. (2004). Water pollution and bioremediation by microalgae: absorption and adsorption of heavy metals by microalgae. *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phyecology*, 439 - 447.

King, R., Long, G., y Sheldon, J. (1997). *Practical environmental bioremediation, the field guide*. Editorial CRC Press

Koru, E. (2012). *Earth food Spirulina (Arthrospira): production and quality standards*. Editorial Food additive.

Kuyucak, N., y Volesky, B. (1988). Biosorbents for recovery of metals from industrial solutions. *Biotechnology letters*, 10(2), 137-142. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/BF01024641>

- Leresche, J., y Meyer, H. (2006). Chemocatalysis and Biocatalysts (biotransformation): some thoughts of a chemist and of a biotechnologist. *Organic Process Research and Development*, 10 (3), 572 - 580.
- Liu, Y., Xu, L., Cheng, N., Lin, L., y Zhang, C. (2000). Inhibitory effect of phycocyanin from *Spirulina platensis* on the growth of human leukemia K562 cells. *Journal of Applied Phycology*, 12(2), 125-130.
- López, F. y Rojas, R. (2010). *Diseño y Montaje de un Fotobiorreactor a Escala Laboratorio para la Producción de Microalgas*. (Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Recuperado de <https://studylib.es/doc/6409265/dise%C3%B1o-y-montaje-de-un-fotobiorreactor-a-escala-laborator>
- Lüning, K. (2005). *Endogenous rhythms and day length effects in macroalgal development*. Recuperado de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9NADUHyFZaEC&oi=fnd&pg=PA347&dq=Endogenous+rhythms+and+day+length+effects+in+macroalgal+development.+In:+R.A.+Andersen+\(ed.\).&ots=BxDu8IDUVi&sig=GUqKGF3fViaRNJBj7ijCUaVA8i4#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9NADUHyFZaEC&oi=fnd&pg=PA347&dq=Endogenous+rhythms+and+day+length+effects+in+macroalgal+development.+In:+R.A.+Andersen+(ed.).&ots=BxDu8IDUVi&sig=GUqKGF3fViaRNJBj7ijCUaVA8i4#v=onepage&q&f=false)
- Malakootian, M., Khodashenas, Z., y Malakootian, M. (2016). The efficiency of lead biosorption from industrial wastewater by micro-alga *Spirulina platensis*. *International Journal of Environmental Research*, 10(3), 357-366. doi: [10.22059/ijer.2016.58755](https://doi.org/10.22059/ijer.2016.58755)
- Marrero-Coto, J., Díaz-Valdivia, A., y Coto-Pérez, O. (2010). Mecanismos moleculares de Resistencia a Metales Pesados en las Bacterias y sus aplicaciones en la biorremediación. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 41(1), 67-78. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181221644010.pdf>
- Maza, L., Guevara, M., Gómez, B., Arredondo, B., Cortez, R., y Licet, B. (2017). Producción de pigmentos procedentes de *Arthrospira máxima* cultivada en fotobiorreactores. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(1), 108-114. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/59671>
- Medaura, M., Guivernau, M., Prenafeta, F., Moreno-Ventas, X. y Viñas-Canals, M. (2013). Micorremediación y su aplicación para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos pesados. In *V simposio iberoamericano de residuos sólidos*. Recuperado de <http://www.redisa.net/doc/artSim2013/TratamientoYValorizacionDeResiduos/Micro>

[remediacion%20y%20Aplicacion%20Tratamiento%20Suelos%20Contaminados%20con%20Hidrocarburos.pdf](#)

- Mehrotra, A., Mishra, R., Tripathi, R., y Shukla, N. (2016). Mapping of arsenic contamination severity in Bahraich district of Ghagra basin, Uttar Pradesh, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7, 101-112. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.871354>
- Mezzomo, N., Saggiorato, A., Siebert, R., Tatsch, P., Lago, M., Hemkemeier, M., y Colla, L. (2010). Cultivation of microalgae *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) from biological treatment of swine wastewater. *Journal Food Science and Technology*, 30(1), 173-178. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612010000100026>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). Real Decreto N° 817/2015. Recuperado de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2015/09/11/817>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2013). Resolución Ministerial N°273-2013- VIVIENDA. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/23087/RM-273-2013-VIVIENDA.pdf>
- Molina, N., Aguilar, P., y Cordovez, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia y tecnología para la salud visual y ocular*, 8(1), 77-88.
- Mosa, K., Saadoun, I., Kumar, K., Helmy, M., y Dhankher, O. (2016). Potential biotechnological strategies for the cleanup of heavy metals and metalloids. *Frontiers in plant science*, 7, 303. doi: [10.3389/fpls.2016.00303](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00303).
- Moscoso, M. (2019). *Biorremediación de Efluentes de Curtiembre del Parque Industrial de Río Seco, Arequipa. Utilizando microalgas Acutodesmus dimorphus y Arthrospira platensis*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8859>
- Morot-Gaudry, J. (2001). Nitrogen assimilation and protein synthesis. In: *Algal Physiology, Biochemical and Molecular Aspects*, 13(11-12), 894-915.
- Muñoz, C. (2007). *Biosorción de plomo (II) por cáscara de naranja "Citrus cinensis" pretratada*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12672/391>

- Muñoz, M. (2012). *Biotecnología*. (2da ed.). Editorial Universidad Nacional de Quilmes.
- Olarte-Navarro, B. (2007). La cuenca del río Chillón: problemática y potencial productivo. *Ingeniería Industrial*, (25), 53-68.
- Olvera-Ramírez, R., Ríos-Leal, E. y Vicente-García, V. (2003). *Manual de técnicas para el Cultivo y Extracción de Bioproductos a Partir de Microalgas*. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (ENCB).
- Plaza, M., Santoyo, S., Jaime, L., Reina, G., Herrero, M., Señoráns, F., y Ibáñez, E. (2010). Screening for bioactive compounds from algae. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 51(2), 450-455.
- Powles, S. (1984). Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 35: 15 - 44.
- Raja, S., Dinesh, K., Kesavan, K., Kodungallur, T., y Thrissur, K. (2014). Bioremediation by using of microbes and algae with special reference to coastline environment. *International Journal Biosciences Nanosciences*, 1(6), 130-140. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Selvaraju\\_Raja/publication/269332530\\_Bioremediation\\_by\\_using\\_of\\_microbes\\_and\\_algae\\_with\\_special\\_reference\\_to\\_Coastline\\_Environment/links/5486da6e0cf289302e2c5ef6/Bioremediation-by-using-of-microbes-and-algae-with-special-reference-to-Coastline-Environment.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Selvaraju_Raja/publication/269332530_Bioremediation_by_using_of_microbes_and_algae_with_special_reference_to_Coastline_Environment/links/5486da6e0cf289302e2c5ef6/Bioremediation-by-using-of-microbes-and-algae-with-special-reference-to-Coastline-Environment.pdf)
- Rajendran, P., Muthukrishnam, J. y Gunasekaran, P. (2003). Microbes in heavy metal remediation. *Indian Journal of Experimental Biology*, 41(9), 935-944
- Real Academia Española. (s.f.). Adsorción. *En Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 15 de octubre de 2019, de <https://dle.rae.es/adsorci%C3%B3n>
- Real Academia Española. (s.f.). Absorción. *En Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 15 de octubre de 2019, de <https://dle.rae.es/adsorci%C3%B3n>
- Real Academia Española. (s.f.). Anaerobiosis. *En Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 1 de octubre de 2019, de <https://dle.rae.es/anaerobiosis?m=form>

- Reyes, C. (2012). *Estudio de la contaminación de las aguas del río Chillón*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1082>
- Rezaei, H. (2016). Biosorption of chromium by using *Spirulina* sp. *Arabian Journal of Chemistry*, 9(6), 846-853. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.11.008>
- Richmond, A. (1986). *Handbook of Microalgal Mass Culture*. Editorial CRC Press.
- Rivera, C., y Díaz, C. (2004). Grandes taxones de fitobentos y su relación con la hidrología, física y química de pequeños ríos Andinos. *Universitas Scientiarum*, 9(1), 75-86.
- Robledo, D. (1997). Las algas y la biodiversidad. *Biodiversitas*, 13, 2-4. Recuperado de <http://200.12.166.51/janium/Documentos/1401.pdf>
- Robledo, F., Aquines, O., Silva, A., Alemán, G., Castillo, C., Ramirez, R. y Parra, R. (2020). Evaluation and Predictive Modeling of Removal Condition for Bioadsorption of Indigo Blue Dye by *Spirulina platensis*. *Microorganisms*, 8(1), 82. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010082>
- Romero, K. (2009). Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1), 45-46. Recuperado de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1817-74332009000100013&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013&lng=es&tlng=es).
- Roset, J., Aguayo, S., y Muñoz, M. (2001). Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. *Revista toxicológica*, 18, 65-71.
- Ruíz-Leza, H., Rodríguez-Jasso, R., Rodríguez-Herrera, R., Contreras-Esquivel, J., y Aguilar, C. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. *Revista Mexicana de ingeniería química*, 6(1), 33-40.
- Ruíz-Martínez, A. (2011). *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/e618/f395caedcef37359d9293a0bcae872bae15f.pdf>

- Salvat, L. (1969). Espectrofotometría de absorción atómica, su aplicación en la industria del vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 8(6), 659-668.
- Sánchez, K. (2018). *Evaluación del diseño de un fotobiorreactor con iluminación fotovoltaica para la obtención de biomasa Arthrospira platensis (Nordstedt) Gomont empleando agua residual hidropónica*. (Tesis de grado). Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.ucss.edu.pe/handle/UCSS/537>
- Sánchez, H. (2014). *Cultivo de Spirulina platensis (Gomont) geitler en fast biol t20 para la obtención de biomasa como fuente alternativa de proteína*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Sasson, A. (1997). Microalgal biotechnologies: Recent developments and prospects for developing countries. *Asia-Pacific Marine Biotechnology Conference, Phuket, Thailand*.
- Téllez, J., Roxs, M., y Gaitán, A. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en procesos productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina*, 52(1), 50-6. [doi:10.15446/revfacmed](https://doi.org/10.15446/revfacmed)
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, (64), 9-18. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906402.pdf>
- Tomaselli, L. (1997). Morphology, ultrastructure and taxonomy of *Arthrospira (Spirulina) maxima* and *Arthrospira (Spirulina) Platensis*. *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*, 1-16. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=6g9ydnbJKUYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Tomaselli,+L.,+1997.+Morphology,+ultraestructure+and+taxonomy+of+Arthrospira+\(Spirulina\)+maxima+and+Arthrospira+\(Spirulina\)+platensis.+Londres.+Taylor+%26+Francis+Ed.+P.p.+1-15.&ots=ELbU6YqMMY&sig=84nwOfMCZbWWa0cEOGv7emiJUQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=6g9ydnbJKUYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Tomaselli,+L.,+1997.+Morphology,+ultraestructure+and+taxonomy+of+Arthrospira+(Spirulina)+maxima+and+Arthrospira+(Spirulina)+platensis.+Londres.+Taylor+%26+Francis+Ed.+P.p.+1-15.&ots=ELbU6YqMMY&sig=84nwOfMCZbWWa0cEOGv7emiJUQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Vásquez-Villalobos, V., Vergaray, D., Suarez, S., Zamora, A., Gaspar, K., y Ecurra, X. (2014). Influencia de la proporción agua de mar y bicarbonato en la producción de biomasa de *Spirulina* sp. con iluminación de diodo emisor de luz. *Scientia agropecuaria*, 5 (1), 199-209. Recuperado de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2077-99172014000400004](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172014000400004)

- Vásquez, V., Vergaray, D., Méndez, J., Barrios, I., Baquedano, R., Caldas, C., Cruz, J., Gamboa, J., y Rivera, I. (2017). Effect of the light emitting diodes intensity and photoperiod in the optimization of the *Spirulina* (*Arthrospira*) biomass production. *Journal Scientia Agropecuaria*, 8(1), 43-55. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.01.04>
- Vera-Hernández, L. (2002). *Análisis de aforo de la Estación Hidrométrica Obrajillo-período 2000-2001*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Tesis/Ingenie/Vera\\_H\\_L/indice.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Tesis/Ingenie/Vera_H_L/indice.htm)
- Vilcapoma, G. (2007). Frutos Silvestres (solanáceas) de la cuenca del Río Chillón, provincia de Canta, Lima-Perú. *Ecología Aplicada*, 6 (1-2), 23-37. Recuperado de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-22162007000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162007000100003&lng=es&tlng=es)
- Villota, M., Morales, M., y Rodríguez, L. (2018). La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la Laguna de Ubaque, Colombia. *Revista de investigación desarrollo e innovación*, 9 (1), 163-176. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6763329>
- Vonshak, A., y Tomaselli, L. (2000). *Arthrospira* (*Spirulina*): Systematics and Ecophysiology. *In the Ecology of Cyanobacteria*, 505-522.
- Watanabe, K. (2001). Microorganisms relevant to bioremediation. *Current Opinion in Biotechnology*, 12, 237-241.
- Wright, J. (2003). *Environmental Chemistry*. (1st ed.). Editorial New York: Routledge.
- Xylem Analytics Germany GmbH. (2010). Photometry Analysis Manual ba75509e15 pHotoFlex Turb. Alemania.
- Zhao, X., y Wang, J. (2012). A brief study on the degradation kinetics of seven organophosphorus pesticides in skimmed milk cultured with *Lactobacillus* spp. *Food Chem*, 131(1), 300-304. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.046>

## TERMINOLOGÍA

**Adsorción:** Dicho de un cuerpo: Atraer y retener en su superficie moléculas o iones de otro cuerpo (Real Academia Española (RAE, 2019))

**Absorción:** Dicho de un tejido orgánico o de una célula: Incorporar materias o sustancias externas (Real Academia Española (RAE, 2019))

**Anaerobiosis:** Vida en un ambiente desprovisto de oxígeno (Real Academia Española (RAE, 2019))

**Biomasa algal:** La biomasa de algas puede derivarse de recursos naturales o cultivados, que pueden o no estar predefinidos mediante la selección y caracterización de especies, así como por recolección de especies la cuales pueden variar según su origen (Plaza *et al.*, 2010).

**Bioacumulación:** Proceso de acumulación de ciertos productos dentro de los organismos. Algunos metales pesados e hidrocarburos clorados son acumulados por los organismos acuáticos. Es por eso que pueden encontrarse concentraciones muy altas de estos elementos químicos en tejidos biológicos, aun cuando se hallen extremadamente diluidos en el medio acuático circundante (Alminagorta, 2018)

**Biorreactor:** Los Biorreactores son los equipos donde se realiza el proceso de cultivo (también comúnmente denominado “fermentador”), sea en estado sólido o líquido (Ruíz-Leza *et al.*, 2007).

**Bioteología:** Uso integrado de la bioquímica, la microbiología y la ingeniería genética para poder aplicar las capacidades de microorganismos, células cultivadas animales o vegetales o parte de estos en la industria, en la salud y en los procesos relacionados con el medioambiente (Federación Europea de Bioteología [EFB] 1998, citado por Muñoz, 2012, p.29).

**Biotransformación:** Mediante este proceso se produce la transformación de un compuesto químico en otro mediante el usando un sistema biológico, que puede ser un organismo



completo; es decir, si se lleva a cabo con la ayuda de una célula completa (usualmente) conteniendo la enzima necesaria, se habla de biotransformación (Leresche y Meyer, 2006).

**Biosorción:** Es el proceso que consiste en el incremento de la concentración de iones y moléculas en una superficie líquida o sólida, ya que existen fuerzas no compensadas en las superficies sólidas o líquidas. Es decir, es un proceso fisicoquímico en el que intervienen procesos de absorción y adsorción de iones y moléculas (Muñoz, 2007).

**Cianobacteria:** Las cianobacterias o cianofíceas (algas azules), son microorganismos procariontes, aeróbicos y fotoautótrofos. La fotosíntesis es su principal modo de obtención de energía (Roset *et al.*, 2001)

**Contaminación:** La introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o energía en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos, o de los ecosistemas terrestres que dependen directamente de ecosistemas acuáticos, y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente, tal como se menciona en el Real Decreto 817/2015 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente [MAPA], 2015).

**Fotoperiodo:** En biología se emplea para denominar a el tiempo que un ser vivo se expone a la luz, en este periodo se desarrollarán diferentes y diversos procesos en el organismo vegetal que permitirán el funcionamiento y regulación biológica. El fotoperiodo en las algas guarda relación con los relojes moleculares los cuales controlaran los ritmos diarios que se manifestara en la reproducción (Lüning, 2005)

**Fotótrofos:** Los organismos fotótrofos son los que utilizan la luz como fuente de energía. Capturan y convierten la energía de fotones a energía utilizada bioquímicamente y es a través de la fotosíntesis que los fotótrofos obtienen la energía y poder reductor necesario para incorporar CO<sub>2</sub> y la fabricación de moléculas orgánicas que se requieren para el crecimiento (López y Rojas, 2010)

**Efluente:** Agua residual que sale de una planta o un proceso de tratamiento, tal como se menciona en la Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2013).

**Espectrofotometría:** Es un método analítico que proviene de los siguientes términos: Espectro, se refiere a radiaciones electromagnéticas (Luz monocromática), la cual está caracterizada por una frecuencia o número de onda o longitud de onda. Fotometría, refiriéndose a la medición de la luz y/o energía radiante relativa a la intensidad (Salvat, 1969)

**Microalga:** Las microalgas son organismos unicelulares microscópicos (2-200  $\mu\text{m}$ ), polifiléticos, su metabolismo puede ser autótrofo o heterótrofo y suelen ser eucariontes, aunque las cianobacterias procariontes son frecuentemente incluidas como microalgas (Greenwell *et al.*, 2009).

**Micorremediación:** Es la biorremediación realizada por hongos también conocida como biorremediación fúngica, dado que emplea hongos para remover o degradar toxinas del medio ambiente (suelo y/o agua). La micorremediación en suelos involucra la siembra de micelios con un soporte de origen vegetal como fuente de nutrientes (Medaura *et al.*, 2013).

**Óxido-reducción:** Conocido también como potencial redox es un proceso en el cual la oxidación relativa de los metales de una solución acuosa en ambientes anaerobios pequeños genera la precipitación del metal esto como consecuencia de la presencia de iones ferrosos y carbonatos; no obstante, bajo condiciones oxidantes los metales suelen volverse solubles (Covarrubias *et al.*, 2015).



## Apéndice 2

### Manual de uso del pFotoFlex Turb para Nitrógeno

Nitrogen (total)

Program no.

35



WTW model no.:	14537
Category:	KT (reaction cell test)
Cell:	18 mm
Measuring range:	0.50 - 15.00 mg/l N

**Note:** Before using the test with your photometer for the first time, determine the reagent blank value.



Pipette 10.0 ml of sample into an empty cell.



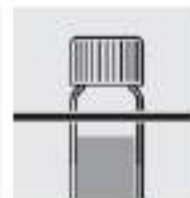
Add 1 level blue microspoon of N-1K.



Add 5 drops of N-2K, close cell with screw cap and mix.



Heat the cell in the thermonactor for one hour at 120 °C.



Place the cell in the cell rack again and let it cool down to room temperature (=prepared sample).



Add 1 level blue microspoon of N-3K into a reaction cell and close the cell with the screw cap.



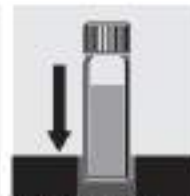
To dissolve solids, shake the cell **vigorously** for 1 minute.



With a pipette add 1.5 ml of prepared sample very slowly, close with screw cap and mix vigorously. **Caution, cell becomes very hot!**



Allow to react for 10 minutes.



Insert the cell in the photometer cell shaft and start measurement.

#### Notes:

- We recommend to determine a new reagent blank value each time when starting a new package using a reaction cell from the same package.
- Sample solution and reagents must have a temperature of 20-25 °C. Temper as necessary.
- For further notes please refer to the package insert of the test.

Fuente: Xylem Analytics Germany GmbH (2010) Photometry Analysis Manual ba75509e15 pFotoFlex® Turb.

## Apéndice 3

### Manual de uso del pHotoFlex Turb para Fósforo

Phosphate: Total P

Program no.

86



WTW model no.:	P625
Category:	KT (reaction cell test)
Cell:	16 mm
Measuring range:	0.05 - 3.00 mg/l PO <sub>4</sub> -P 0.15 - 9.20 mg/l PO <sub>4</sub>
	Display in mmol/l possible



Check the pH value of the sample. Desired range: pH 0-10. Correct with diluted sodium hydroxide solution or sulfuric acid as necessary.



Pipette 5.0 ml of sample into a reaction cell and mix.



Add one dose of P-1K with the green measurer and close the cell with the screw cap.



Heat the reaction cell in the thermoreactor at 120 °C for 30 minutes.



Remove the reaction cell from the thermoreactor and let it cool down to room temperature in a cell rack.



Add 5 drops of P-2K, close cell with screw cap and mix.



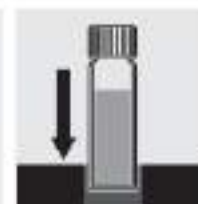
Add one dose of P-3K with the blue measurer and close the cell with the screw cap.



Shake the cell vigorously to dissolve solids.



Allow to react for 5 minutes.



Insert the cell in the photometer cell shaft and start measurement.

#### Notes:

- We recommend to determine a new reagent blank value each time when starting a new package using a reaction cell from the same package.
- In the case high levels of chloride it is recommended to swap the order of the reagents P-2K and P-3K.
- For further notes please refer to the package insert of the test.

Fuente: Xylem Analytics Germany GmbH (2010) Photometry Analysis Manual ba75509e15 pHotoFlex® Turb.

## Apéndice 4

### Manual de uso del pFotoFlex Turb para Cromo

Chrome  
Program no.

5



WTW model no.:	14552
Category:	KT (reaction cell test)
Cell:	16 mm
Measuring range:	0.05 - 2.00 mg/l Cr
	Display in mmol/l possible



Check the pH value of the sample.  
Desired range: pH 1-6. Correct with diluted sodium hydroxide solution or sulfuric acid as necessary.



Add 5 drops of Cr-3K into a reaction cell and close with screw cap.



Shake the cell vigorously to dissolve solids.



Allow to react for 1 minute.



Add 5.0 ml sample with a pipette, close the cell with the screw cap and mix.



Allow to react for 1 minute.



Insert the cell in the photometer cell shaft and start measurement.

**Notes:**

- We recommend to determine a new reagent blank value each time when starting a new package using a reaction cell from the same package.
- For further notes please refer to the package insert of the test.

Fuente: Xylem Analytics Germany GmbH (2010) Photometry Analysis Manual ba75509e15 pFotoFlex® Turb.

## Apéndice 5

### Manual de uso del pFotoFlex Turb para Plomo

Lead

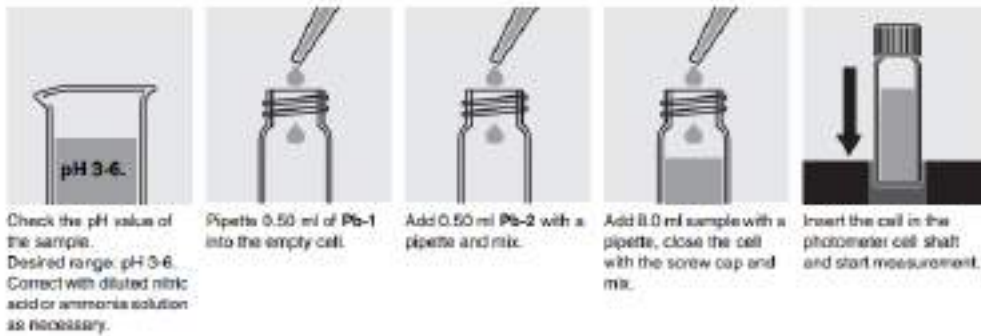
Program no.

2



WTW model no.:	09717
Category:	RT (reagent test)
Cell:	28 mm
Measuring range:	0.01 - 4.00 mg/l Pb
	Display in mmol/l possible

**Note:** Before using the test with your photometer for the first time, determine the reagent blank value.



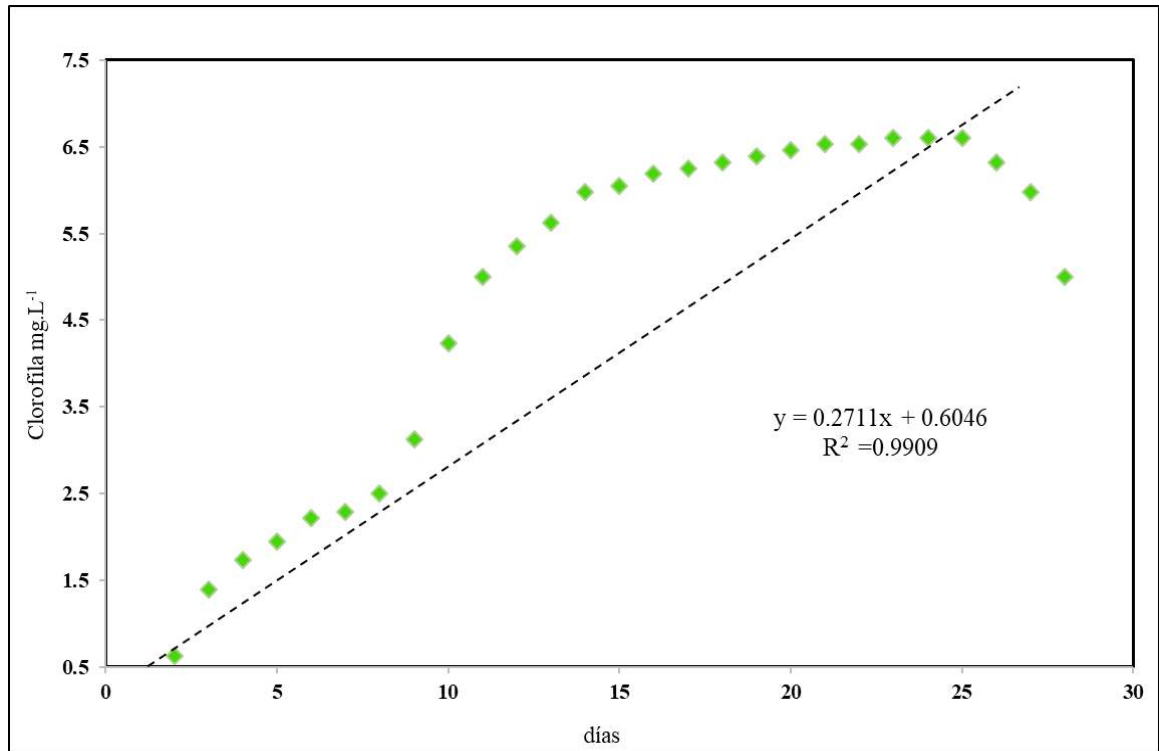
**Notes:**

- We recommend to determine a new reagent blank value for each test set package started.
- For further notes please refer to the package insert of the test.

Fuente: Xylem Analytics Germany GmbH (2010) Photometry Analysis Manual ba75509e15 pFotoFlex® Turb.

## Apéndice 6

### Curva de crecimiento de biomasa de *Arthrospira platensis* en 28 días



Fuente: Elaboración propia



## Apéndice 7

### Valores de concentración de clorofila “a” en 28 días

DÍAS	CLOROFILA
1	0,417
2	0,6255
3	1,39
4	1,7375
5	1,946
6	2,224
7	2,2935
8	2,502
9	3,1275
10	4,2395
11	5,004
12	5,3515
13	5,6295
14	5,977
15	6,0465
16	6,1855
17	6,255
18	6,3245
19	6,394
20	6,4635
21	6,533
22	6,533
23	6,6025
24	6,6025
25	6,6025
26	6,3245
27	5,977
28	5,004

*Fuente:* Elaboración propia.

## Apéndice 8

### Norma Legal

<b>18 NORMAS LEGALES</b> <span style="float: right;">Miércoles 7 de junio de 2017 /  El Peruano</span>						
Categoría 4: Conservación del ambiente acuático						
Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
<b>FÍSICO-QUÍMICOS</b>						
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cloruro Libre	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (Pt)	Color verdadero Escala P/Co	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,058	**	**	**	**
Conductividad	(µS/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	<b>mg/L</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>10</b>
Fosfatos	mg/L	2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
<b>Fósforo total</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,035</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,124</b>	<b>0,062</b>
Nitratos (NO <sub>3</sub> ) (c)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoníaco Total (NH <sub>4</sub> )	mg/L	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
<b>Nitrógeno Total</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,315</b>	<b>**</b>	<b>**</b>	<b>**</b>	<b>**</b>
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
<b>INORGÁNICOS</b>						
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,00025	0,00025	0,00025	0,0088	0,0068
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
<b>Cromo VI</b>	<b>mg/L</b>	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Niquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0081	0,0061
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,061	0,061

*Fuente:* Diario Oficial El Peruano (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias D.S. N°004-2017-MINAM.

**Apéndice 9**  
**Análisis Estadístico ANOVA**

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Cromo	Entre grupos	0,015	6	0,002	6,471	0,002
	Dentro de grupos	0,005	14	0,000		
	Total	0,020	20			
Nitrogeno	Entre grupos	294,842	6	49,140	59,810	0,000
	Dentro de grupos	11,503	14	0,822		
	Total	306,344	20			
Fosforo	Entre grupos	12,744	6	2,124	105,649	0,000
	Dentro de grupos	0,281	14	0,020		
	Total	13,026	20			
PH	Entre grupos	0,158	6	0,026	5,030	0,006
	Dentro de grupos	0,073	14	0,005		
	Total	0,231	20			
Conductividad	Entre grupos	2,459	6	0,410	152,621	0,000
	Dentro de grupos	0,038	14	0,003		
	Total	2,497	20			
Temperatura	Entre grupos	1,765	6	0,294	9,503	0,000
	Dentro de grupos	0,433	14	0,031		
	Total	2,198	20			
Dbo5	Entre grupos	413,739	6	68,956	97,011	0,000
	Dentro de grupos	9,951	14	0,711		
	Total	423,690	20			

*Fuente:* Elaboración propia.

**Apéndice 10**  
**Análisis Post Hoc para Conductividad**

CONDUCTIVIDAD				
HSD Tukey <sup>a</sup>				
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
CONTROL	3	0,7133		
TRATAMIENTO 3	3		1,2367	
TRATAMIENTO 6	3		1,2467	
TRATAMIENTO 2	3		1,3067	
TRATAMIENTO 5	3		1,3200	
TRATAMIENTO 1	3			1,7267
TRATAMIENTO 4	3			1,8467
Sig.		1,000	0,472	0,135

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Apéndice 11**  
**Análisis Post Hoc para Temperatura**

<b>TEMPERATURA</b>			
HSD Tukey <sub>a</sub>			
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
		1	2
CONTROL	3	21,3000	
TRATAMIENTO 1	3		22,1000
TRATAMIENTO 2	3		22,1333
TRATAMIENTO 3	3		22,1333
TRATAMIENTO 4	3		22,1333
TRATAMIENTO 5	3		22,1333
TRATAMIENTO 6	3		22,1333
Sig.		1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Apéndice 12**  
**Análisis Post Hoc para pH**

**pH**

HSD Tukey<sub>a</sub>

TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
		1	2
CONTROL	3	7,9000	
TRATAMIENTO 2	3	8,0000	8,0000
TRATAMIENTO 4	3	8,0333	8,0333
TRATAMIENTO 5	3	8,0667	8,0667
TRATAMIENTO 3	3	8,0667	8,0667
TRATAMIENTO 1	3		8,1667
TRATAMIENTO 6	3		8,1667
Sig.		0,139	0,139

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Apéndice 13**  
**Análisis Post Hoc para DBO<sub>5</sub>**

**DBO<sub>5</sub>**

HSD Tukey<sup>a</sup>

TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	3
CONTROL	3	74,4531		
TRATAMIENTO 1	3	74,7900		
TRATAMIENTO 2	3		80,1407	
TRATAMIENTO 4	3		80,4774	
TRATAMIENTO 5	3			85,1935
TRATAMIENTO 3	3			85,2002
TRATAMIENTO 6	3			85,5234
<b>Sig.</b>		0,999	0,999	0,999

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Apéndice 14**  
**Análisis Post Hoc para Cromo**

<b>CROMO</b>			
HSD Tukey <sub>a</sub>			
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa =	
		0,05	
		1	2
CONTROL	3	0,0000	
TRATAMIENTO 4	3	0,0267	
TRATAMIENTO 6	3	0,0333	
TRATAMIENTO 3	3	0,0367	
TRATAMIENTO 1	3	0,0500	0,0500
TRATAMIENTO 5	3	0,0533	0,0533
TRATAMIENTO 2	3		0,0933
Sig.		0,056	0,164

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

*Fuente:* Elaboración propia.



**Apéndice 15**  
**Análisis Post Hoc para Fósforo**

<b>FOSFORO</b>					
HSD Tukey <sub>a</sub>					
		Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTOS	N	1	2	3	4
TRATAMIENTO 1	3	1,1167			
TRATAMIENTO 4	3	1,1167			
TRATAMIENTO 5	3		2,1967		
TRATAMIENTO 2	3		2,5533	2,5533	
CONTROL	3			2,7767	2,7767
TRATAMIENTO 3	3				3,0233
TRATAMIENTO 6	3				3,0933
Sig.		1,000	0,090	0,494	0,160

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Apéndice 16**  
**Análisis Post Hoc para Nitrógeno**

<b>NITROGENO</b>					
HSD Tukey <sub>a</sub>					
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05			
		1	2	3	4
CONTROL	3	1,6233			
TRATAMIENTO 6	3		7,9600		
TRATAMIENTO 5	3		9,2433	9,2433	
TRATAMIENTO 3	3		9,2500	9,2500	
TRATAMIENTO 2	3			11,2767	
TRATAMIENTO 4	3			11,7167	
TRATAMIENTO 1	3				14,5767
Sig.		1,000	0,602	0,057	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

*Fuente:* Elaboración propia.

## Apéndice 17

### Informe de Calibración del Multiparámetro (MULTI - 3430)



**CORPORACION METROLOGICA ORION S.R.L**

#### INFORME DE VERIFICACIÓN OPERACIONAL N° 4167/19

**SOLICITANTE** : ENVIRONMENTAL TESTING LABORATORY S.A.C.  
**DIRECCION** : Calle 8 Mz Lote 40 Urb. Panamericana-SMP  
**FECHA DE VERIFICACIÓN** : 01 de Febrero del 2019  
**PROXIMA VERIFICACIÓN** : Febrero del 2020

**INSTRUMENTO** : MULTIPARAMETRO DE INDICACION DIGITAL  
**FABRICANTE** : WTW  
**MODELO** : MULTI 3430  
**SERIE** : 16031690  
**CODIGO** : MON-119

#### CONDICIONES DE VERIFICACIÓN

Temperatura ambiental: Inicial : 23,4 °C Final : 24,8 °C  
Humedad relativa: Inicial : 62 % Final : 60 %

#### METODO DE VERIFICACIÓN

La verificación operacional se realizó mediante el instructivo PCAL-CMO-05 "calibración de Multiparámetro pH/CE/OD".

#### ESTANDARES UTILIZADOS

- Solución de conductividad de 1413 uS/cm marca HANNA lote 3476
- Solución de conductividad de 1413 uS/cm marca HANNA lote 4032
- Buffer de pH 4 Marca HANNA Lote 3075.
- Buffer de pH 7 Marca HANNA Lote 3563.
- Buffer de pH 10 Marca HANNA Lote 3556.
- Buffer de pH 4 Marca HANNA Lote 3347.
- Buffer de pH 7 Marca HANNA Lote 3333.
- Buffer de pH 10 Marca HANNA Lote 3357.
- Solución de Cloruro de Potasio KCl 4M.

#### RESULTADOS

- Los resultados de la verificación se muestran en la página 02 del presente documento.
- Para la estimación de la incertidumbre se ha utilizado un factor de cobertura  $K = 2$  con un nivel de confianza de 95%.

#### OBSERVACIONES

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "ETIQUETA DE VERIFICACIÓN OPERACIONAL".

#### CONCLUSIONES

El instrumento se encuentra operativo y cumple con las tolerancias indicadas en los certificados de análisis.

Realizado por:

  
HAROLD YAGUE UCHICA  
 **CORPORACION METROLOGICA ORION S.R.L.**  
Departamento de Metrología

TELÉFONO	TELEFAX	RPM/ RPC	E-mail
Av. Prog. Iquitos N° 2487 Of. 304 Lima 14, Perú	422-6090 Nacional: 613*4955	6976832268 917014737	info@corpmeton.com.pe

Huella

PCAL-05  
Página 1 de 3

Fuente: Corporación Meteorológica Orión S.R.L



RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN OPERACIONAL

CALIBRACIÓN (AJUSTE)

Valor del Buffer (pH)	Valor ajustado (pH)	Temperatura (°C)
4.01	4.01	25.0
7.01	7.01	25.0
10.01	10.01	25.0

VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN

Valor Nominal Solución a 25 °C	Valores Obtenidos (pH)	Desviación (pH)	Promedio (pH)	Incertidumbre (±pH)	Error Máximo Permisible
4.01 pH	4.02	0.01	4.02	0.01	± 0.01 pH
	4.01	0.00			
	4.02	0.01			

Valor Nominal Solución a 25 °C	Valores Obtenidos (pH)	Desviación (pH)	Promedio (pH)	Incertidumbre (±pH)	Error Máximo Permisible
7.01 pH	7.02	0.01	7.01	0.01	± 0.01 pH
	7.01	0.00			
	7.01	0.00			

Valor Nominal Solución a 25 °C	Valores Obtenidos (pH)	Desviación (pH)	Promedio (pH)	Incertidumbre (±pH)	Error Máximo Permisible
10.01 pH	10.01	0.00	10.01	0.02	± 0.02 pH
	10.01	0.00			
	10.02	0.01			

PC-M-01  
CORPORACION METROLOGICA ORION SRL      TELEFAX      RPM/ RPC      E-mail  
Av. Prolog. Equinos N° 2487 Of. 304      422-6090      9976832268      info@corporacion.com.pe  
Lima 14, Perú      Nextel: 61344955      987414737

19/6

01/11/19  
Página 2 de 3

Fuente: Corporación Meteorológica Orión S.R.L

**CONDUCTIVIDAD****CALIBRACIÓN (AJUSTE)**

Valor de la solución (uS/cm)	Valor ajustado (uS/cm)	Temperatura (°C)
1413	1413	25

**VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN**

Código/Valor nominal solución a 25°C	Valores obtenidos (uS/cm)	Desviación (uS/cm)	Promedio (uS/cm)	Incertidumbre (uS/cm)	Error máximo permisible
1413 uS/cm	1414	1	1414.33	± 5	± 5 uS/cm
	1413	0			
	1416	3			

**OXIGENO DISUELTO****CALIBRACIÓN (AJUSTE)**

VALOR NOMINAL DE AJUSTE (%)	VALOR AJUSTADO (%)	TEMPERATURA (°C)
100	100	24.0

**VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN**

Valores obtenidos (%)	Desviación (%)	Promedio (%)	Incertidumbre (%)	Error Máximo Permisible
100.3	0.3	100.2	± 0.35	±1%
100.1	0.1			
100.2	0.2			

RP-00-00

**CORPORACION METROLOGICA ORION SRL****TELEFAX****RPM/ RPC****E-mail**

Av. Prosg. Iquitos N° 2487 Of. 304

422-6090

+51 76832268

info@corporim.com.pe

Lima 14, Perú

Neotel: 613\*4955

987414737

PAG: 01

PAG: 01  
Página 3 de 3

Fuente: Corporación Meteorológica Orión S.R.L.