



Universidad Científica del Perú - UCP
*Registrado en el Asiento N° A00010 de la Partida N° 11000318, Personas Jurídicas de Iquitos,
Superintendencia de los Registros Públicos - SUNARP*

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**“FICOREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES A PARTIR
DEL CULTIVO DE *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. IQUITOS, LORETO-
PERÚ”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AMBIENTAL

AUTOR : Patricia Carolina Gálvez del Aguila

ASESORA : Blga. Marianella Cobos Ruiz Dra.

San Juan Bautista – Loreto – Maynas – Perú

2019

DEDICATORIA

**A Dios, por todas las bendiciones, guía y
fortaleza para ejecutar todo cuanto está
narrado.**

**A mi esposo, Jason,
por sus decididos ánimos,
confianza y respaldo en TODOS mis proyectos.**

**A mi Nicole, quién me acompañó durante
todo el proceso de ejecución de la tesis, y
se fue convirtiendo en mi firme
motivación.**

**A mis padres, porque me enseñaron lo
necesario para enfrentar con actitud
positiva y perseverante los desafíos en
la vida.**

Patricia Carolina Gálvez del Aguila

AGRADECIMIENTO

Al proyecto de investigación “Bioprospección de microalgas con potencial aplicación para la producción sustentable de biodiesel en la Amazonía peruana” subvencionado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC y la Universidad Científica del Perú (UCP) por el apoyo financiero brindado para la realización de la presente tesis.

Al Laboratorio de Biotecnología y Bioenergética de la Universidad Científica del Perú por permitirnos el uso de sus equipos, materiales y reactivos.

A la Dra. Marianela Cobos Ruiz, por brindarme su asesoría y la oportunidad de realizar mi tesis a través del proyecto “Bioprospección de microalgas con potencial aplicación para la producción sustentable de biodiesel en la Amazonía peruana”; confiando en mí capacidad, por medio de su apoyo y motivación, antes, durante y después de la ejecución de la tesis. Juntamente con las Licenciadas en Ecología, Lilia Díaz y Margarita Urcia, quienes cultivaron el banco de cepas de microalgas, con las que realicé el proyecto.

Al bachiller Alex Tapullima, por su tiempo, paciencia y conocimiento en el adiestramiento de técnicas de laboratorio y apoyo constante.

A mi esposo e hija, por sus paciencia, ánimos y confianza inquebrantables. A mis padres, por su apoyo y respaldo constantes; y a mi amiga María Casuso, por la disposición de su tiempo ayudándome en el desarrollo de la tesis. Porque, fortalecieron mi determinación y confianza para la culminación de la tesis, a todas ellas MUCHAS GRACIAS.

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP

El presidente del Comité de Ética de la Universidad Científica del Perú - UCP

Hace constar que:

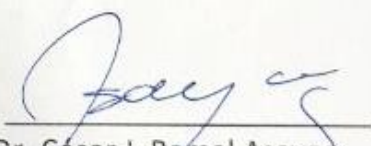
La Tesis titulada:

**"FICO REMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES A PARTIR DEL
CULTIVO DE *Chlorella sp.* Y *Ankistrodesmus sp.* IQUITOS, LORETO - PERÚ".**

De la alumna: **PATRICIA CAROLINA GÁLVEZ DEL AGUILA**, de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, pasó satisfactoriamente la revisión por el Software Antiplagio, con un porcentaje de **8% de similitud**.

Se expide la presente, a solicitud de la parte interesada para los fines que estime conveniente.

San Juan, 29 de enero del 2020.



Dr. César J. Ramal Asayag
Presidente del Comité de Ética - UCP

CIRA/lasda
015 - 2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Con Resolución Decanal N°166-2013-UCP-FCEI del 17 de octubre de 2013, la FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP designa como Jurado Evaluador de la sustentación de tesis a los señores:

- | | |
|--|------------|
| • Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera, M.Sc. | Presidente |
| • Ing. Anibal Lopez Peña | Miembro |
| • Dr. Juan Carlos Castro Gómez | Miembro |

Como Asesora: **Dra. Marianela Cobos Ruiz**

En la ciudad de Iquitos, siendo las 11 horas del día 07 de febrero del 2020, en las instalaciones de la UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa de la Tesis: "**Ficoremediación de aguas residuales municipales a partir del cultivo de *Chlorella* sp y *Ankistrodesmus* sp**".

Presentado por la sustentante: **PATRICIA CAROLINA GALVEZ DEL ÁGUILA**

Como requisito para optar el título profesional de: **INGENIERO AMBIENTAL**

Luego de escuchar la sustentación y formuladas las preguntas las que fueron: ABSUELTAS

El jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión:

La sustentación es: APROBADA POR UNANIMIDAD

En fe de lo cual los miembros del Jurado firman el acta.

		
Miembro	Presidente	Miembro

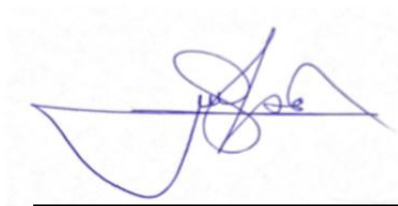
Contáctanos:

Iquitos - Perú:
065 - 26 1088 / 065 - 26 2240
Av. Abelardo Quiñones Km. 2.5

Filial Tarapoto - Perú
42 - 58 5638 / 42 - 58 5640
Leoncio Prado 1070 / Martines de Compagñon 933

Universidad Científica del Perú
www.ucp.edu.pe

JURADO CALIFICADOR Y DICTAMINADOR

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized 'U' and 'I' that are interconnected, with a horizontal line extending to the right.

Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera, M.Sc

PRESIDENTE

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized 'P' and 'L' that are interconnected, with a horizontal line extending to the right.

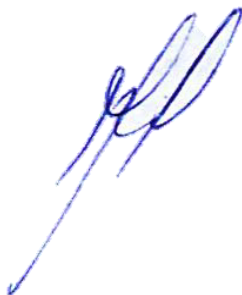
Ing. Anibal López Peña

MIEMBRO

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized 'J' and 'C' that are interconnected, with a horizontal line extending to the right.

Dr. Juan Carlos Castro Gómez

MIEMBRO

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized 'M' and 'C' that are interconnected, with a horizontal line extending to the right.

Dra. Marianela Cobos Ruíz

ASESORA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
➤ DEDICATORIA	ii
➤ AGRADECIMIENTO	iii
➤ APROBACIÓN	iv
➤ INDICE DE CONTENIDO	v
➤ INDICE DE GRÁFICOS	vi
➤ INDICE DE IMÁGENES	vi
➤ INDICE DE TABLAS	vi
➤ RESUMEN. PALABRAS CLAVE	viii
➤ ABSTRACT	ix
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	4
2.1. Características Generales de las microalgas	4
2.1.1. Tipos de sistemas de tratamiento con microalgas	5
2.1.2. Fitorremediación	6
2.2. Características de las aguas residuales	7
2.2.1. Características físicas	7
2.2.2. Características químicas	8
2.2.3. Características biológicas	8
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	9
3.1. Área de estudio	9
3.2. Tipo y diseño de la investigación	9
3.3. Población y muestra	10
3.3.1. Población	10
3.3.2. Muestra	10
3.4. Técnica, instrumentos y procedimientos de recolección de datos	11
3.4.1. Técnicas de recolección de datos	11
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos	11
3.4.3. Procedimientos de recolección de datos	11
3.5. Procesamiento de los datos	16
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17

4.1. Resultados	17
4.2. Discusión	22
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
5.1. Conclusiones	26
5.2. Recomendaciones	26
CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
CAPÍTULO VII: ANEXOS (Opcional)	31

ÍNDICE DE GRÁFICOS

N°	TÍTULO	Pág.
01.	Diseño de la investigación	12
02.	Perfil de crecimiento de <i>Ankistrodesmus</i> sp. y <i>Chlorella</i> sp. durante el periodo de cultivo en el agua residual de la salida del desagüe de Moronacocha	14
03.	Perfil de crecimiento de <i>Ankistrodesmus</i> sp. y <i>Chlorella</i> sp. durante el periodo de cultivo en el agua residual de la salida del desagüe del Puerto el Huequito	15

ÍNDICE DE IMÁGENES

N°	TÍTULO	Pág.
01.	Recolección de agua residual	6
02.	Proceso de filtrado	6
03.	Esterilización de agua residual	8
04.	Cultivo de microalgas en medio CHU	9

ÍNDICE DE TABLAS

N°	TÍTULO	Pág.
01.	Parámetros Químicos registrados del agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha. Julio 2013	12
02.	Parámetros Químicos registrados del agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha. Julio 2013	13
03.	Producción de biomasa y porcentaje de lípidos de las microalgas	17

RESUMEN

La aplicación de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales, se basa en utilizarlas como microorganismos “purificadores de aguas residuales”, aprovechando los nutrientes presentes del agua como medio de cultivo. Este proceso es conocido actualmente como ficorremediación; es así que el objetivo en este estudio fue ficorremediar las aguas residuales municipales, a partir del cultivo de *Ankistrodesmus sp.* y *Chlorella sp.* Las muestras de aguas residuales fueron colectadas de las salidas de desagüe de Moronacocha y del Puerto el Huequito. La evaluación de ficorremediación se realizó por un período de 15 días, a través del análisis físico-químico de las muestras de agua residual colectadas, antes y después, del cultivo de cada especie de microalgas en cada muestra. La ficorremediación en las aguas colectadas en la salida de desagüe de Moronacocha se logró altos porcentajes de remoción de CO₂, fosfatos y amonio al 87.5%, 47.5% y 100.0% respectivamente en *Chlorella sp.*; y en 78.8%, 45.0% y 100% respectivamente en *Ankistrodesmus sp.* En las aguas colectadas en la salida de desagüe del Puerto el Huequito se logró altos porcentajes de remoción de CO₂, fosfatos y amonio al 92.0%, 36.8% y 97.20% respectivamente en *Chlorella sp.*; y en 72.0%, 21.1% y 100% respectivamente en *Ankistrodesmus sp.* La tasa de crecimiento en el cultivo de las aguas colectadas en la salida de desagüe de Moronacocha se obtuvo 310 ± 0.02 mg/L y 280 ± 0.03 mg/L en *Chlorella sp.* y *Ankistrodesmus sp.* respectivamente con sus porcentajes de lípidos totales de 23.87 ± 0.21 y 27.81 ± 0.37 ; mientras que en las aguas colectadas en la salida de desagüe del Puerto el Huequito se obtuvo 330 ± 0.04 mg/L y 280 ± 0.02 mg/L en *Chlorella sp.* y *Ankistrodesmus sp.* respectivamente con sus porcentajes de lípidos totales de 22.31 ± 0.26 y 28.63 ± 0.84 . En conclusión, se ha demostrado que, sí es posible la ficorremediación de aguas residuales a partir del cultivo de *Ankistrodesmus sp.* y *Chlorella sp.*

Palabras clave: Aguas residuales, microalgas, ficorremediación, remoción

ABSTRACT

The application of microalgae in wastewater treatment is based on using them as "wastewater purifying" microorganisms, taking advantage of the nutrients present in the water as a culture medium. This process is known as phycoremediation; so, the objective in this study was to reduce municipal wastewater, from the cultivation of *Ankistrodesmus* sp. and *Chlorella* sp. The wastewater samples were collected from the Moronacocha and Puerto el Huequito drainage outlets. The phytoremediation evaluation was carried out for a period of 15 days, through the physical-chemical analysis of the residual water samples collected, before and after, of the culture of each microalgae species in each sample. The phoremediation in the waters collected at the Moronacocha drain outlet achieved high percentages of removal of CO₂, phosphates and ammonium at 87.5%, 47.5% and 100.0% respectively in *Chlorella* sp. ; and in 78.8%, 45.0% and 100% respectively in *Ankistrodesmus* sp. In the waters collected at the outlet of the El Huequito port, high percentages of removal of CO₂, phosphates and ammonium were achieved at 92.0%, 36.8% and 97.20% respectively in *Chlorella* sp. ; and in 72.0%, 21.1% and 100% respectively in *Ankistrodesmus* sp. The growth rate in the culture of the waters collected at the Moronacocha drain outlet was 310 ± 0.02 mg / L and 280 ± 0.03 mg / L in *Chlorella* sp and *Ankistrodesmus* sp. respectively with their total lipid percentages of 23.87 ± 0.21 and 27.81 ± 0.37 ; while in the waters collected at the drain outlet of Puerto el Huequito, 330 ± 0.04 mg / L and 280 ± 0.02 mg / L were obtained in *Chlorella* sp and *Ankistrodesmus* sp. respectively with their total lipid percentages of 22.31 ± 0.26 and 28.63 ± 0.84 . In conclusion, it has been shown that, if possible, wastewater remediation from the culture of *Ankistrodesmus* sp. and *Chlorella* sp.

Keywords: Wastewater, microalgae, phycoremediation, removal

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El continuo deterioro del medio ambiente debido a la incorporación de contaminantes de origen antropogénico, y más concretamente en los sistemas acuáticos, tiene un impacto negativo directo en la calidad del agua. Una de las principales fuentes de contaminación del agua son las aguas residuales urbanas (1). Entendiéndose que, las aguas residuales son aquellas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población después de haber sido modificada por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias (2). La mayoría de las aguas residuales son generalmente peligrosas para las poblaciones humanas y el medio ambiente y debe tratarse antes de su eliminación en arroyos, lagos, mares y superficies de tierra (3).

Desde 1990, la contaminación del agua ha aumentado en la mayoría de los ríos de África, Asia y América Latina, debido a la creciente cantidad de aguas residuales como resultado del crecimiento demográfico, el aumento de la actividad económica y la expansión de la agricultura, así como el vertido de aguas residuales sin tratamiento (o apenas con niveles mínimos) (4). La gestión de las aguas residuales generalmente recibe poca atención social y política en comparación con los retos del abastecimiento de agua, especialmente en el contexto de la escasez de agua. Sin embargo, ambos están intrínsecamente relacionados: actuar con negligencia en relación con las aguas residuales puede tener impactos altamente perjudiciales para la sostenibilidad del abastecimiento de agua, la salud humana, la economía y el medio ambiente (5).

Considerando que, anualmente, en el mundo se generan en promedio 330 km³ de aguas residuales, de las cuales entre un 25-35% es tratada (6). El efecto contaminante del vertido de aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas en el medio ambiente no sólo provoca la contaminación de las aguas superficiales, sino también, el suelo y las aguas subterráneas (5) . Este acto podrá tener cualquiera de estas tres consecuencias: efectos adversos para la salud humana por la reducción de la calidad del agua; efectos ambientales

negativos debido a la degradación de las masas de agua y de los ecosistemas; y posibles efectos en las actividades económicas (7).

En referencia a los efectos ambientales negativos; tenemos el problema de la eutrofización, que se produce a partir del proceso por el cual una masa de agua se enriquece con nutrientes disueltos (por ejemplo, nitrógeno y fósforo) que estimulan el crecimiento de plantas acuáticas, lo que generalmente da como resultado el agotamiento del oxígeno disuelto (5).

En el Perú, más de la tercera parte de la población no cuenta con la cobertura de saneamiento, con lo cual se pone en riesgo a la tercera parte de la población por falta de políticas y gestión del Tratamiento de Agua Potable y de Aguas Residuales (8); planteando serios desafíos ambientales ante la liberación de aguas residuales industriales y municipales, para los cuerpos de agua receptores (3, 9).

Ante la problemática de los cuerpos de agua contaminados directamente por el vertimiento de aguas residuales sin previo tratamiento, en la última década se inició la investigación en procesos biológicos convencionales de tratamiento, evolucionado hacia el desarrollo de sistemas compactos con mayor producción energética o que conlleven a la pérdida de los nutrientes presentes en el agua residual (10). De los diferentes procesos para el tratamiento de aguas residuales (aeróbicos, anaeróbicos, químicos, físicos y/o biológicos), se encuentra el utilizar microalgas para el tratamiento o remediación de las aguas residuales, denominado ficorremediación. La ficorremediación, es ecológica y ofrece las ventajas de ser rentable, eliminar nutrientes y producir biomasa que puede ser utilizada para la elaboración de diversos productos; el mismo que es ampliamente reconocido, dado que las microalgas poseen la capacidad de eliminación o biotransformación de contaminantes, sobre todo en la eliminación de nutrientes (C, N y P), bacterias coliformes, metales pesados y la reducción de la demanda de oxígeno químico y biológico, la eliminación y/o degradación de compuestos xenobióticos y otros contaminantes; estos pueden ser captados por la biomasa microalgal y pueden ser recuperados mediante su cosecha (11). Existen diferentes estudios con respecto a la utilización de diversas especies de

microalgas, con distintos resultados de acuerdo a cada especie y al tipo de agua residual tratada, todos con fines de poder minimizar la contaminación de los cuerpos de aguas receptores.

Ante la descripción de los acontecimientos y hechos expuestos líneas arriba, se reconoce la necesidad de poder presentar alternativas de bajo costo y con alta efectividad en el tratamiento de aguas residuales. En este sentido, el objetivo principal de la presente investigación es fitorremediar las aguas residuales municipales, a partir del cultivo de *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp., por medio de la remoción de nutrientes, con la finalidad de implementar una estrategia que permita mitigar en gran medida la contaminación de los cuerpos de agua receptores de aguas residuales y así contribuir a mejorar la calidad de vida de la población y por ende del medio ambiente.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Características Generales de las microalgas

Las microalgas son un conjunto heterogéneo de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes (cianobacterias) y eucariontes, que se localizan en hábitats diversos tales como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo un amplio rango de temperaturas, pH y disponibilidad de nutrientes; se les considera responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta. Su biodiversidad es enorme, se han identificado alrededor de 40,000 especies aunque se estima que existen más de 100,000, de las cuales con frecuencia se desconoce su composición bioquímica y metabolismo (12, 13).

Las microalgas se clasifican de acuerdo a varios parámetros tales como pigmentación, ciclo de vida, morfología y estructura celular. Las especies más estudiadas para aplicaciones biotecnológicas corresponden a las algas verdes y a las diatomeas (12, 13)

El atractivo de las microalgas posteriormente fue encauzado hacia otras aplicaciones tales como la acuicultura (cultivo de especies acuáticas vegetales y animales en medios naturales y artificiales), el tratamiento de aguas residuales, la obtención de sustancias químicas finas, la producción de farmacéuticos y los procesos de bioconversión energética. La producción de bioenergía a partir de microalgas fue contemplada desde los años cincuenta. Sin embargo, a partir de la crisis energética de 1975, el potencial económico de esta tecnología fue reconocido por varios países como EUA, Japón y Australia (12, 14).

Los ciclos de vida son cortos e incluyen la formación de esporas de resistencia o de células de reposo, con lo cual sobreviven en situaciones desfavorables, su nutrición es por absorción iónica de C, H, O, N, P, S, K, Ca, Fe, Mg, así como de cantidades traza de Mn, B, Co, Cu, Zn y Mo; si bien, para algunas especies son

necesarias otras moléculas inorgánicas y orgánicas complejas. De los grupos que las conforman, las cianofitas, clorofitas, crisófitas, euglenofitas y diatomeas pennales son más comunes en las aguas dulces (15).

2.1.1. Tipos de sistemas de tratamiento con microalgas

Existen diferentes tipos de sistemas de tratamiento que utilizan cultivos microalgales, los cuales se explican a continuación:

- **Pileta no aireada:** es un sistema muy simple, de poca profundidad, el cual tiene la posibilidad de combinar dos tipos de tratamiento, como son el secundario y terciario; sin embargo presenta bajas eficiencias y es difícil la recuperación de microalgas.
- **Pileta aireada:** es un sistema más complejo de oxidación, el cual tiene un mecanismo de aireación, por lo que aumenta la oxigenación, presentando de ésta manera una mayor eficiencia y recuperación de la biomasa por filtración en grava.
- **Lagunas de oxidación:** son estanques poco profundos (entre 30 y 60 cm), con mecanismos de aireación y agitación, los cuales favorecen el crecimiento de las microalgas. En este sistema se favorece el aumento en la degradación bacteriana, ocasionado por el incremento en la oxigenación, lo cual provoca la proliferación de microalgas, y por lo tanto, aumenta la eficiencia global del tratamiento de las aguas residuales.
- **Lagunas de alta tasa de oxidación:** es un diseño similar al anterior, el cual se aplica a las aguas residuales con tratamiento secundario, siendo éstas inoculadas con altas densidades microalgales. En la cual se obtiene una biomasa mixta, la cual aumenta la tasa de oxidación, la tasa de remoción y por lo tanto la eficiencia global del sistema.
- **Lagunas de oxidación de algas:** es un diseño similar al anterior, sin embargo en este caso, está orientado hacia la producción de biomasa con fines de alimentación y/o producción de metabolitos de interés comercial (pigmentos).

2.1.2. Ficaremediación

Ficaremediación puede ser definida en un sentido amplio como el uso de macroalgas o de microalgas para la eliminación o biotransformación de los contaminantes, incluyendo nutrientes y xenobióticos de las aguas residuales y CO₂ de aire de salida con la propagación de la biomasa concomitantemente (16, 17).

El tratamiento biológico, ficoremediación, mejora la eliminación de nutrientes, metales pesados y patógenos y amortigua el O₂ a las bacterias aeróbicas heterotróficas orgánicas, utilizando a su vez, el CO₂ liberado de la respiración bacteriana (18), como lo muestra la siguiente figura:

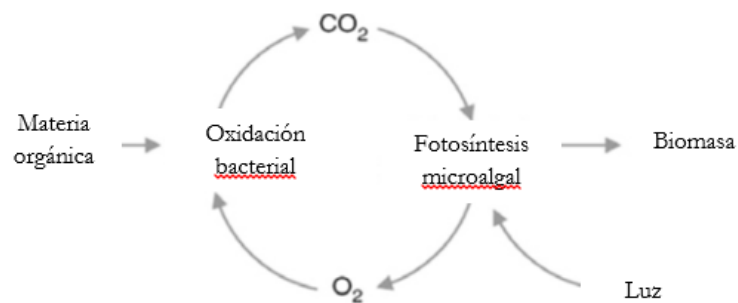


Figura 01. Principio de la oxigenación fotosintética en el proceso de remoción de DBO (18).

Por lo tanto, la aireación fotosintética es especialmente interesante para reducir los costos de operación, estudios recientes han demostrado que las microalgas pueden lograr la degradación aeróbica de los diversos contaminantes peligrosos. Los mecanismos implicados en microalgas para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales industriales son similares a los del tratamiento de las aguas residuales domésticas.

La ficoremediación comprende varias aplicaciones: (i) eliminación de nutrientes de las aguas residuales y efluentes ricos en materia orgánica municipal; (ii) la eliminación de nutrientes y compuestos xenobióticos con la ayuda de bioabsorbentes a base de algas; (iii) el tratamiento de las aguas residuales ácidas

y de metales pesados; (iv) secuestro de CO₂; (v) la transformación y la degradación de xenobióticos, y (vi) detección de compuestos tóxicos con la ayuda de bio-sensores basados en algas. La eliminación de nutrientes con la ayuda de microalgas se compara muy favorablemente con otras tecnologías convencionales (19).

2.2. Características de las aguas residuales

La calidad de las aguas residuales puede estar definida por sus características físicas, químicas, y constituyentes biológicos de las aguas residuales y sus fuentes se enumeran en el siguiente esquema.

2.2.1. Características Físicas

La temperatura de las aguas residuales es importante, ya que afecta a las reacciones químicas y biológicas de los organismos acuáticos. Las altas temperaturas pueden aumentar especies planctónicas indeseables y hongos. La temperatura también es muy importante en la determinación de diversos parámetros tales como el pH, la conductividad, el nivel de saturación de los gases y diversas formas de alcalinidad, etc. El color de las aguas residuales domésticas es generalmente indicativa de su edad. Tanques sépticos domésticos adquieren un aspecto negro debido a las reacciones biológicas de los materiales orgánicos e inorgánicos. La aparición de las aguas residuales industriales depende de la naturaleza del producto fabricado. Los olores presentes en las aguas residuales se deben principalmente a las impurezas disueltas, a menudo de naturaleza orgánica causada por la descomposición y la acumulación de gases. El olor más característico de las aguas residuales es putrefacto, causado por el sulfuro de hidrógeno y el amoníaco, producidos por microorganismos anaerobios. El contenido total de sólidos se denota por varios tipos de material disuelto y suspendido que queda como residuo en las aguas residuales (20).

2.2.2. Características Químicas

Las tres cuartas partes de carbono orgánico en las aguas residuales están presentes como hidratos de carbono, grasas, proteínas, aminoácidos y ácidos volátiles. El material orgánico es normalmente una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno y otros elementos importantes, tales como azufre, fósforo y amoníaco (21). Los constituyentes inorgánicos incluyen grandes concentraciones de sodio, calcio, potasio, magnesio, cloro, azufre, fosfato, bicarbonato, sales de amonio y metales pesados (22). La aparición de amoniaco en el agua residual puede ser aceptada como la prueba química de la contaminación orgánica (21). Las aguas residuales cuentan con grandes cantidades de materia nitrogenada.

2.2.3. Características Biológicas

Los parámetros biológicos son quizás de mayor importancia para el tratamiento de aguas residuales. Naturalmente, las aguas residuales contienen grandes cantidades de organismos macro y microscópicos. La cantidad de una especie de micro y macro organismos y animales acuáticos en un cuerpo receptor de las aguas residuales determina la efectividad del tratamiento. Dentro de las instalaciones de tratamiento, las aguas residuales proporcionan un medio ideal para el crecimiento microbiano potencial, con independencia de ser el tratamiento anaeróbico de aguas residuales o aeróbico (23).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el laboratorio de Biotecnología y Bioenergética de la Universidad Científica del Perú (UCP), ubicado en la Av. Abelardo Quiñonez km 2,5, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, departamento de Loreto; y el análisis de lípidos totales se realizó en el Centro de Investigación de Recursos Naturales de la Amazonía Peruana (CIRNA – UNAP). La toma de muestra de aguas residuales, se realizó en las salidas de desagüe de Moronacocha y del Puerto el Huequito.

3.2. Tipo y Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue de tipo experimental, porque se evaluó el porcentaje de remoción de nutrientes de las aguas residuales domésticas, a partir del cultivo de *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp.

Inicialmente, se cultivaron las microalgas *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. en 250 ml de medio CHU por 9 días (24, 25). Después, se recolectó el agua residual de las salidas de los desagües de Moronacocha y del Puerto el Huequito, las que fueron sometidas a un proceso de filtrado y estilización, y se determinaron sus parámetros físico – químicos el mismo día de la colecta. Seguidamente se cosecharon las microalgas cultivadas por centrifugación a 4°C, 4000 RPM por 30 minutos. La biomasa microalgal obtenida fue añadida (80 µl) en matraces de 1 L que contenía 500 ml de agua residual. La evaluación fue realizada por 15 días, durante los cuales se llevó un conteo de su crecimiento.

Una vez culminado el periodo de cultivo, se procedió a cosechar la biomasa obtenida por centrifugación y el sobrenadante fue recolectado para realizar

los análisis físicos – químicos finales y análisis de lípidos totales a partir de la biomasa microalgal.

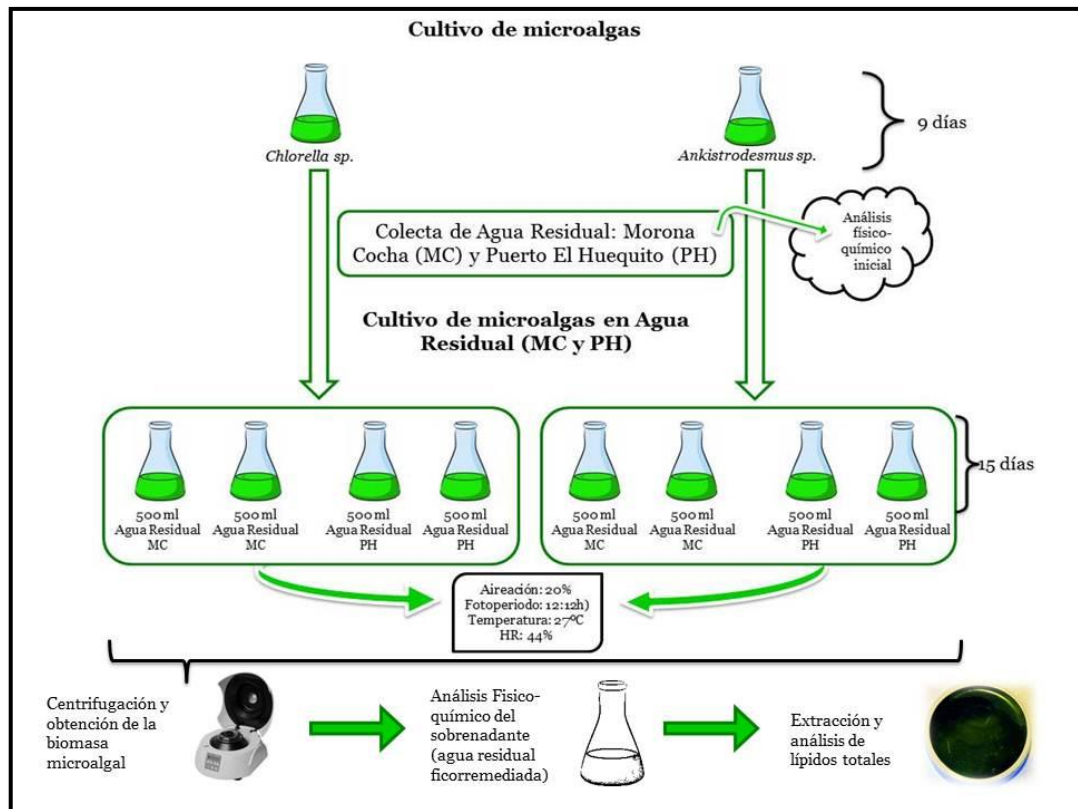


Gráfico N°01. Diseño de la investigación.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Estuvo constituida por las aguas residuales domésticas de la ciudad de Iquitos y las especies de microalgas amazónicas.

3.3.2. Muestra

Conformada por las aguas residuales provenientes de las salidas de desagüe de Moronacocha y Puerto Turístico el Huequito. Y las especies de microalgas *Ankistrodesmus sp.* y *Chlorella sp.*

3.4. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

Observación directa y microscópica. Se tomaron registros de resultados de laboratorio y técnicas directas de colecta de agua.

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

Se empleó un microscopio óptico, un microscopio de epifluorescencia (Carl Zeiss), una cabina de flujo laminar (Telstar Bio II Advance), computadora (Hp), pH metro, autoclave (Yamatto), centrífuga (HETTICH ZENTRIFUEN – D-78532Tuttlie – Universal 32R), balanza analítica (SARTORIUS-TE2101), bomba para pecera BOYU y Kit La motte. Además, se utilizaron las fichas de registro en Excel, para almacenar los datos obtenidos.

3.4.3. Procedimientos de recolección de datos

3.4.3.1. Recolección de Agua Residual

Se recolectaron las aguas residuales domésticas provenientes de las salidas de desagüe de Moronacocha y Puerto Turístico el Huequito y fueron colocados en 2 galones de 3.57 litros cada uno con ayuda de baldes de plástico y embudos, que sirvieron como coladores artesanales, fabricados con mallas de nylon para filtrar residuos sólidos de mayor tamaño.



Imagen N°01. Recolección de agua residual

Imagen N°02. Proceso de filtrado

3.4.3.2. Determinación de las características físico-químicas de las aguas residuales

Se analizaron los siguientes parámetros físico-químicos: pH, cloruro, CO₂ y dureza, con el kit de La Motte, proporcionado por la Universidad Científica del Perú (UCP).

Las concentraciones de Sodio se determinaron por método gravimétrico con acetato de magnesio y uranilo. Se tomó 50 ml de muestra y se evaporó a la mitad del volumen. Se añadió gotas de ácido acético y 10 ml de la solución de acetato de magnesio y uranilo, se dejó reposar por 12 horas para una precipitación completa, para luego centrifugar y separar los cristales formados. Por último, se secó en una estufa a 90°C y se pesó.

El contenido de potasio se determinó por método espectrofotométrico con cobalto nitrito de potasio y dicromato de potasio. A 10 ml de muestra se añadió gotas de ácido nítrico, luego 5ml de la solución de cobalto nitrito de sodio y se dejó en reposo por cuatro horas para su precipitación. Luego se centrifugó y desechó el sobrenadante, para disolver el precipitado con 5 ml de [H₂SO₄ concentrado] y 5 ml de [dicromato de potasio], hasta completar a 50 ml. Se midió la absorbancia de las soluciones a 430nm, utilizando agua destilada para calibrar.

La concentración de calcio se determinó por volumetría con EDTA. Se tomó 100 ml de muestra, se añadió 3 ml de solución 1 N de NaOH y luego unos cuantos miligramos del indicador Murexida. Se valoró con EDTA a 0,02 N hasta verificarse un cambio de color de rosado a violeta. Se leyó el volumen gastado para realizar los cálculos.

Los fosfatos se determinaron por colorimetría con Molibdo - Vanadato de Amonio. Se tomó 10 ml de muestra y se añadió HNO₃. Luego se adicionó

5 ml de la mezcla Molibdo – Vanadato de Amonio con el cual se coloreó de amarillo. Se midió luego con una absorbancia a 420 nm.

Por último, el amonio se determinó por colorimetría con Reactivo de Nessler. Se usó el kit colorimétrico con las soluciones 1 y 2, luego se comparó con la carta de colores.

Los análisis de sodio, potasio, calcio, fosfatos y amonio se realizaron en el laboratorio de Química Orgánica de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), de acuerdo con el protocolo de Golterman y Clymo (26).

3.4.3.3. Pre –tratamiento del agua residual

a) Filtrado del agua residual

El agua residual, pasó por un proceso de doble filtrado para la eliminación de los sólidos suspendidos, utilizando para ello un colador casero, para residuos mayores a 1 cm y para una segunda filtración (efluente secundario) utilizando malla de nylon para residuos menores a 1 cm.

b) Esterilización del agua residual

Para evitar la presencia de algún otro microorganismo que haga competencia en el crecimiento de las microalgas, el agua residual se esterilizó a 121°C por 30 min.



Imagen N°03. Esterilización del agua residual

3.4.3.4. Organismos y condiciones de cultivo

Las microalgas *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. fueron proporcionadas por el Banco de cepas del Laboratorio de Biotecnología y Bioenergética de la Universidad Científica del Perú. Las microalgas se cultivaron en matraces de 250 ml con medio Chu-10 modificado, a una temperatura de 27°C, con intensidad luminosa de 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$, humedad relativa de 43%, un fotoperiodo y aireación de 12:12 h. Los cultivos fueron suministrados de aire por medio de un sistema de mangueras y filtros.

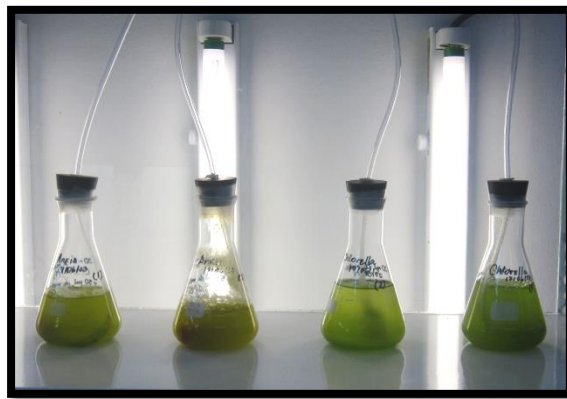


Imagen N°04. Cultivo de microalgas en medio CHU.

3.4.3.5. Tratamiento de las muestras de aguas residuales

El tratamiento de las muestras de agua residual se hizo por duplicado con cada una de las especies microalgales. Se inyectaron aproximadamente 800 μl de biomasa húmeda microalgal de *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. en matraces de 1 litro que contenían 500 ml de aguas residuales. Las condiciones de cultivo fueron las mismas que se indican líneas arriba y la evaluación se realizó durante 15 días con conteos diarios. Asimismo, se midieron los parámetros físico-químicos de las aguas residuales antes y después de someterlas a cada tratamiento. El porcentaje de remoción de nutrientes se calculó a través de la siguiente fórmula (27):

$$\frac{T_i - T_f}{T_i} \times 100\%$$

En donde:

T_i = Concentración del primer día

T_f = Concentración del último día

3.4.3.6. Evaluación de la tasa de crecimiento y producción de biomasa

El conteo de la tasa de crecimiento microalgal se realizó utilizando la cámara de Neubauer, registrándose los datos en fichas de Excel, para luego calcularlos mediante la siguiente fórmula (28):

$$\mu = \frac{\log_2 (N_1/N_0)}{t_1 - t_0}$$

En donde:

N_1 = Número de células o densidad óptima al tiempo final

N_0 = Número de células o densidad óptima al tiempo inicial

t_1 = Tiempo final

t_0 = Tiempo inicial

La producción de biomasa se calculó usando la siguiente ecuación (Frampton):

$$Biomasa\ total \left(\frac{cel}{lt} \right) = (P_{p+b} + P_{pv}) - P_p$$

En donde:

P_{p+b} = peso de la placa más biomasa.

P_{pv} = peso de la placa vacía.

3.4.3.7. Extracción de lípidos totales

Se realizó de acuerdo a Yu *et al.* (29). Después de secar las microalgas, estas fueron transferidas a morteros para su trituración con 8 ml de una mezcla de cloroformo:metanol (2:1). El extracto que se obtuvo se transfirió a microtubos de 2 ml y se añadió 100 µl de NaCl 0,9% por cada 1000 µl de extracto. La solución se homogenizó en vortex por 30 seg y centrifugó a 23000xg a 4°C por 5 min. La fase clorofórmica se filtró con filtros para jeringa de 0,25 µm y transfirió a vasos de precipitado de peso conocido. Los restos celulares y otros componentes retenidos en la fase intermedia (entra fases acuosa y clorofórmica) fueron tratados varias veces con la solución extractora de lípidos (cloroformo:metanol) después de su homogenización en el vortex y centrifugación. Todos los extractos con solventes orgánicos fueron filtrados y transferidos al mismo vaso de precipitado. Los solventes orgánicos se evaporaron del vaso de precipitado en un hotplate a 50°C por 4 horas. Luego los componentes lipídicos retenidos en el vaso de precipitado fueron secados a 50°C por 4 horas. Finalmente, el vaso de precipitado se atemperó a 25°C y se determinó su peso. Por diferencia de peso del vaso de precipitado con y sin los lípidos se determinó la cantidad de lípidos totales obtenidos. El contenido de lípidos se determinó con la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de lípidos (\%)} = \frac{P_L}{P_M} \times 100$$

Donde:

PL = peso seco de los lípidos totales

PM = peso seco de las microalgas.

3.5. Procesamiento de los datos

Para determinar si existen diferencias significativas respecto al porcentaje de remoción de nutrientes por cada especie microalgal, se utilizó el programa Excel de Microsoft Office 2013.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Porcentaje de remoción de nutrientes de las aguas residuales provenientes de las salidas de desagüe de Moronacocha y Puerto Turístico el Huequito

En el agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha el pH inicial fue 7,3; y los valores de pH finales fueron 8,0 (con *Chlorella* sp.) y 8,1 (con *Ankistrodesmus* sp.). Los parámetros químicos también mostraron variaciones con ambas especies de microalgas (Tabla N°01). En general, se puede observar que sí existió remoción de nutrientes en todos los parámetros analizados. Sin embargo, la remoción de Amonio fue la más exitosa en un 100% tanto en el cultivo con *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. Los niveles de CO₂ también disminuyeron, entre un 70% y 80% pero con mayor porcentaje de remoción en el agua residual que se cultivó con *Chlorella* sp. Por su parte, los niveles de Calcio y Fosfatos también reportaron un alto porcentaje de remoción, bordeando el 50%, pero con mayor eficacia en el cultivo con *Chlorella* sp. Los demás nutrientes presentaron un menor porcentaje de remoción.

Tabla N°01. Parámetros Químicos registrados del agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha. Julio 2013

PARÁMETROS QUÍMICOS	VALOR INICIAL (ppm)	VALOR FINAL (ppm)		% DE REMOCIÓN	
		<i>Chlorella</i> sp.	<i>Ankistrodesmus</i> sp.	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Ankistrodesmus</i> sp.
CLORURO	50,00	40,00	40,00	20,0	20,0
CO ₂	40,00	5,00	8,50	87,5	78,8
DUREZA	65,00	52,00	60,00	20,0	7,7
SODIO	16,10	11,96	14,95	25,7	7,1
POTASIO	19,50	12,50	13,40	35,6	31,3
CALCIO	10,40	4,20	6,25	59,6	39,9
FOSFATOS	2,00	1,05	1,10	47,5	45,0
AMONIO	20,00	0,00	0,00	100,0	100,0

Elaboración propia.

El agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito tubo un pH inicial de 7,5, y los valores de pH finales fueron 8,0 (con *Chlorella* sp.) y 7,6 (con *Ankistrodesmus* sp.) Los parámetros químicos también mostraron variaciones con ambas especies de microalgas (Tabla N°02). En general, se puede observar que sí existió remoción de nutrientes en todos los parámetros analizados, con excepción del Calcio, cuya concentración se incrementó en el agua residual en la que se cultivó *Chlorella* sp. Sin embargo, la remoción de Amonio fue la más exitosa nuevamente, en un 100% en el agua residual donde se cultivó con *Chlorella* sp. y en un 97,2% en la que se cultivó *Ankistrodesmus* sp. La remoción de CO₂ fue más efectiva en el agua residual donde se cultivó *Chlorella* sp. en un 92%. Los demás nutrientes también fueron removidos pero menores al 50%.

Tabla N°02. Parámetros Químicos registrados en el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito. Julio 2013

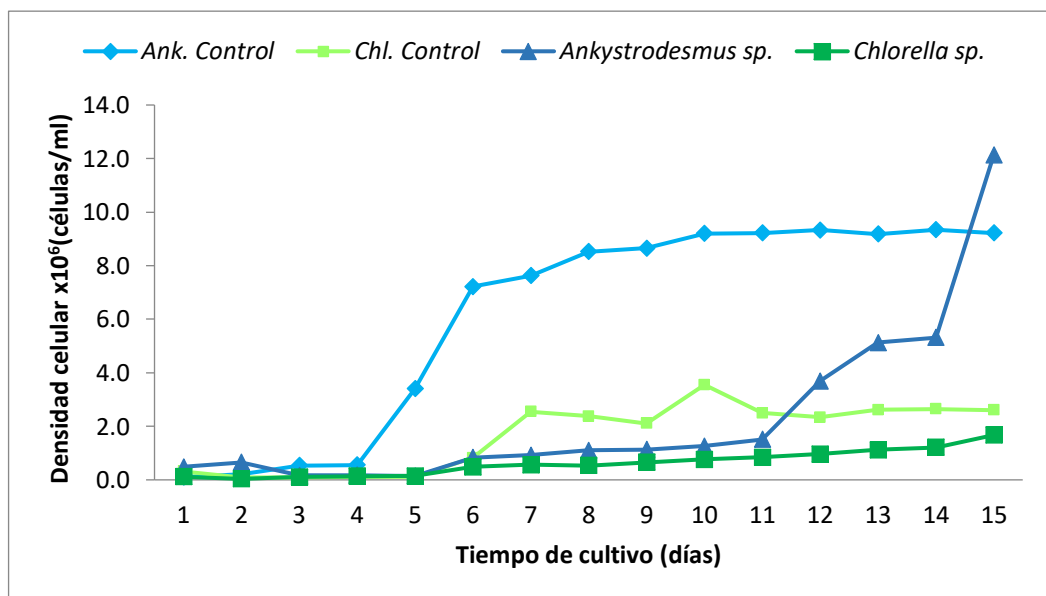
PARÁMETROS QUÍMICOS	VALOR INICIAL (ppm)	VALOR FINAL (ppm)		% DE REMOCIÓN	
		<i>Chlorella</i> sp.	<i>Ankistrodesmus</i> sp.	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Ankistrodesmus</i> sp.
CLORURO	38,00	28,00	36,00	26,3	5,3
CO ₂	50,00	4,00	14,00	92,0	72,0
DUREZA	60,00	32,00	38,00	46,70	36,7
SODIO	10,35	9,89	10,20	1,4	4,4
POTASIO	15,60	15,50	15,40	1,3	0,6
CALCIO	6,80	7,60	5,25	22,8	-11,8
FOSFATOS	1,90	1,20	1,50	21,1	36,8
AMONIO	36,00	1,00	0,00	100,0	97,2

Elaboración propia.

4.1.2. Tasa de crecimiento microalgal de *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. en cultivos de aguas residuales residuales provenientes de las salidas de desagüe de Moronacocha y Puerto Turístico el Huequito.

El crecimiento de microalgas se dio de manera satisfactoria en la muestra de agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha, pero *Ankistrodesmus* sp. presentó una tasa de crecimiento más elevada que *Chlorella* sp. Donde, *Ankistrodesmus* sp., muestra un perfil de crecimiento inicialmente lento, y a partir del cuarto día se puede observar un incremento gradual de la densidad microalgal, iniciando con una densidad de 0.5 cel/ml y finalizando con 12.1 cel/ml; mientras que *Chlorella* sp. muestra un perfil de crecimiento inicialmente lento, y a partir del quinto día se puede observar un incremento gradual de la densidad microalgal, iniciando con una densidad de 0.1 cel/ml y finalizando con 1.7 cel/ml. (Grafico N°02)

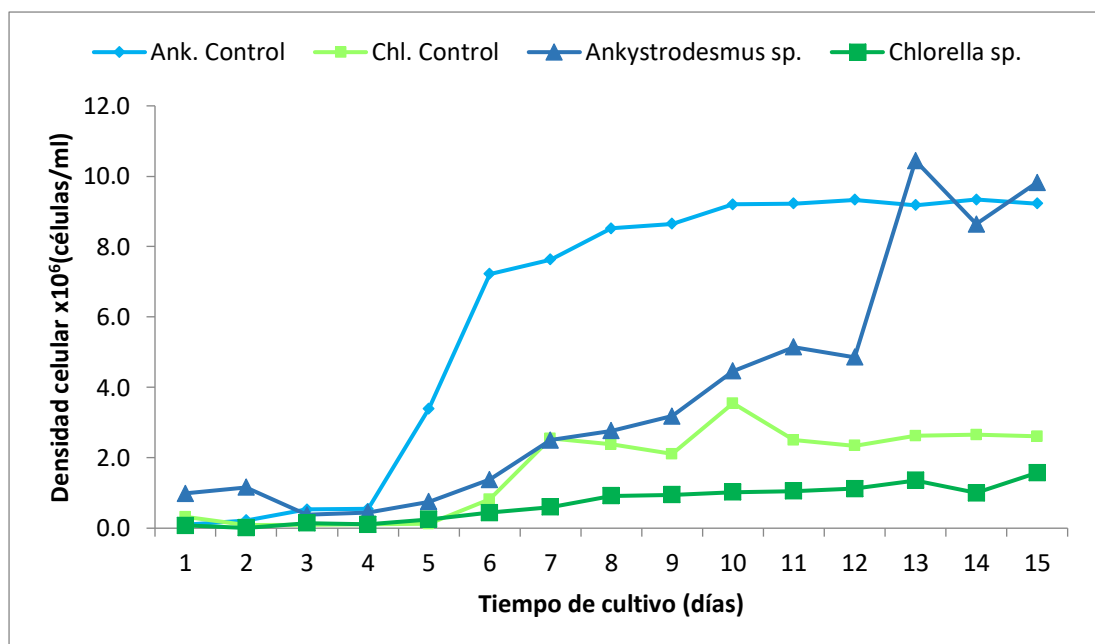
Gráfico N°02. Perfil de crecimiento de *Ankistrodesmus* sp. y *Chlorella* sp. durante el periodo de cultivo en el agua residual de la salida del desagüe de Moronacocha.



Elaboración: Propia

En el agua residual de la salida del desagüe del Puerto el Huequito se verificó el crecimiento de *Ankistrodesmus* sp. y *Chlorella* sp. similar a lo observado en el Gráfico N°02, también se observa una tasa de crecimiento mayor de *Ankistrodesmus* sp. presentando un perfil de crecimiento inicialmente lento con una densidad de 1.0 cel/ml, y a partir del quinto día se puede observar un incremento gradual hasta el día trece con una densidad microalgal de 10.44 cel/ml, para tener un descenso el día catorce y volver a incrementarse a 9.83 cel/ml el día quince. Mientras que *Chlorella* sp. muestra un perfil de crecimiento inicialmente lento, y a partir del onceavo día se puede observar un incremento gradual de la densidad microalgal. Iniciando con una densidad de 0.1 cel/ml y finalizando con 1.6 cel/ml (Gráfico N°03).

Gráfico N°03. Perfil de crecimiento de *Ankistrodesmus* sp. y *Chlorella* sp. durante el periodo de cultivo en el agua residual de la salida del desagüe del Puerto el Huequito.



Elaboración: Propia

4.1.3. Relación existente entre la tasa de crecimiento y el porcentaje de remoción de nutrientes de *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. en cultivos de aguas residuales domésticas provenientes de las salidas de desagüe de Moronacocha y del Puerto Turístico el Huequito.

Al observar el Grafico N°02 y la Tabla N°01 se puede notar que con ambas especies de microalgas existe remoción de nutrientes a partir del crecimiento de éstas, pero en porcentajes distintos con algunos nutrientes. En el agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha la especie que tuvo menor tasa de crecimiento fue *Chlorella* sp. pero logró un 18.6% y 19.7% más de remoción de sodio y calcio, respectivamente, que *Ankistrodesmus* sp. Sin embargo, los cultivos con ambas especies lograron la remoción del 100% de amonio.

Por otro lado, la Gráfico N°03 y la Tabla N°02, que detallan los datos del agua residual de la salida del desagüe del Puerto el Huequito, la especie que tuvo menor tasa de crecimiento también fue *Chlorella* sp. y logró un mayor porcentaje de remoción de nutrientes, pero con excepción del calcio, donde la concentración de éste, se incrementó en un 11.8% luego del periodo de ficoremediación; mientras que *Ankistrodesmus* sp. logró la remoción de calcio en un 22.8% y en el caso del amonio, sólo ésta especie, logró la remoción completa del 100%.

4.1.4. Producción de biomasa y acumulación de lípidos totales de *Chlorella* sp. y *Ankistrodesmus* sp. en cultivos de aguas residuales domésticas provenientes de las salidas de desagüe de Moronacocha y Puerto Turístico el Huequito.

La mayor biomasa microalgal se obtuvo en el cultivo del agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito con *Ankistrodesmus* sp. (330 mg/L). Mientras que en los cultivos con las aguas residuales

de las salidas de desagüe del Puerto el Huequito y de Moronacocha con *Chlorella* sp. se obtuvo la misma cantidad de 280 mg/L.

Así también, el mayor porcentaje de lípidos totales se obtuvo en el cultivo con el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito con *Ankistrodesmus* sp. con un 28.6%. Mientras que el menor porcentaje de lípidos totales se registró en el cultivo con el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito con *Chlorella* sp. con un 22.3% (Tabla N° 03).

Tabla N° 03. Producción de biomasa y porcentaje de lípidos de las microalgas.

ESPECIE	BIOMASA EN PESO SECO (mg/L)	LIPIDOS TOTALES (%)
MORONACOCHA		
<i>Chlorella</i> sp.	310 ± 0.02	23.87 ± 0.21
<i>Ankistrodesmus</i> sp.	280 ± 0.03	27.81 ± 0.37
PUERTO EL HUEQUITO		
<i>Chlorella</i> sp.	330 ± 0.04	22.31 ± 0.26
<i>Ankistrodesmus</i> sp.	280 ± 0.02	28.63 ± 0.84

Elaboración: Propia

4.2. DISCUSIÓN

El uso de microalgas para el tratamiento de las aguas residuales ha sido un tema de investigación y desarrollo de varias décadas. John J (30), introdujo el término ficoremediación, en el año 2000, para referirse a la remediación llevada a cabo por las algas (micro o macro algas); por la característica propia de las mismas, para eliminar cantidades significativas de nutrientes debido a que requieren altas cantidades de nitrógeno y fósforo para la producción de proteína (45-60% de microalgas peso seco), el ácido nucleico y la síntesis de fosfolípidos (31). Sin embargo, a pesar de ser un tema propio del milenio, en la revisión bibliográfica

no se han identificado estudios similares en la región Loreto o en otras regiones del Perú.

En la remoción de nutrientes, los más dañinos al ambiente son la presencia de nitrógeno y fósforo que favorecen a la eutrofización de los cuerpos de aguas (32–34). El nitrógeno puede existir en diferentes formas a causa de diversos estados de oxidación, y puede cambiar fácilmente de una forma a otra dependiendo del estado de oxidación presentes en el momento. En el ambiente, los organismos vivos pueden realizar cambios de un estado de oxidación a otro. Las principales formas de nitrógeno son nitrógeno orgánico, amoníaco (NH_4^+ o NH_3), el nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) (35). Todas las formas de nitrógeno se toman como un nutriente por la microalga, aunque los compuestos de nitrógeno más comunes asimilados por microalgas son amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) (36). En este estudio, los niveles de nitrógeno y fósforo se realizaron a nivel de amonio y fosfatos; donde, las especies *Ankistrodesmus* sp. y *Chlorella* sp. han demostrado una exitosa remoción de amonio en los dos medios de cultivo, tanto con agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha y del Puerto el Huequito; logrando en ambos casos el 100% de remoción.

La tasa de crecimiento microalgal se va a relacionar en función a la presencia de los niveles de nutrientes en las aguas residuales tal y como lo afirma Fathi (27) en su estudio de fitorremediación de aguas residuales en donde cultivó *Chlorella vulgaris* y notó que el crecimiento algal fue significativamente realizado en uno de sus cuatro medios de cultivos debido a sus niveles más altos de nitrógeno y fósforo. De la misma manera, Kong (37) realizó su investigación para proponer desarrollar tecnologías a gran escala para producir biomasa de algas ricas en petróleo a partir de aguas residuales; donde también, verificó que, el nivel de nutrientes influyó enormemente en el crecimiento de algas. En este estudio, se registró altos porcentajes de remoción de nutrientes, sobretodo en el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito, medio en el cual las densidades de crecimiento de *Ankistrodesmus* sp. y *Chlorella* sp. fueron las más altas con 12.1 cel/ml y 1.7 cel/ml, respectivamente. Y para llegar a esos puntos

pasaron por unos siete primeros días de registros bajos de densidad, de los quince que duró el ensayo. En el caso de las aguas residuales de Moronacocha, pasaron doce días de registros de baja densidad, para llegar a su fase exponencial de hasta 8.0 cel/ml en el caso de *Ankistrodesmus* sp.; mientras que *Chlorella* sp. se mantuvo hasta 2.0 cel/ml.

Por otro lado, la fijación del CO₂, que ofrece la ficoremediación es una solución para la amenaza del mundial calentamiento), dado de que la microalga reduce la concentración de CO₂ disuelto en el agua residual mediante la fotosíntesis que, a su vez, eleva el nivel de pH (28). Dentro de los estudios de los efectos del CO₂ y el pH en el crecimiento de las microalgas se demostró que una inyección de aire y una cantidad moderada de CO₂ promovieron el crecimiento de algas. Sin embargo, demasiado CO₂ inhibió el crecimiento de algas debido a una disminución significativa en el pH(37). Ello se vio reflejado en este estudio, donde el segundo nutriente con mayor porcentaje de remoción fue el CO₂, en un 92% con *Chlorella* sp. cultivada en el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito. Ocurriendo lo mismo con los otros ensayos pero con un menor porcentaje de remoción no menor del 70%. Es así que se plantea que las microalgas representan el mejor tratamiento biológico para el agua residual porque aumentan el oxígeno contenido en las aguas residuales por medio de la fotosíntesis (38).

Entonces, dado que, muchas especies de microalgas proliferan en las aguas residuales debido a la abundancia de carbono, nitrógeno y fósforo que actúan como nutrientes para las algas, también existe la posibilidad de combinar el tratamiento de aguas residuales por microalgas, como la eliminación de nutrientes, con la producción de biocombustibles a partir de la biomasa algal (39).

La biomasa algal residual producida constituye una materia prima valiosa para la producción de bioenergía en forma de alcoholes o biogás, alimentación animal, biofertilizantes u otros productos de valor añadido (10).

Chinnasamy (40) en el 2010, afirmó que las aguas residuales industriales y municipales son recursos potenciales para la producción de biocombustibles de microalgas. Se realizó un estudio con aguas residuales, de la ciudad de Dalton, que contenían un 85-90% de efluentes de la industria de alfombras con un 10-15% de aguas residuales municipales, para evaluar la viabilidad de la biomasa de algas y la producción de biodiesel. Las cepas de microalgas nativas fueron aisladas de las aguas residuales de la alfombra. Un consorcio de 15 aislados de algas nativas mostró el 96% de eliminación de nutrientes en las aguas residuales tratadas. Donde, alrededor del 63.9% del aceite de algas obtenido del consorcio podría convertirse en biodiesel. Al igual que Kong (37), quien demostró que el nivel de nutrientes influyó enormemente en el crecimiento de algas, en cuyo estudio se verificó que el contenido de aceite de las microalgas de *Chlamydomonas reinhardtii* fue del 25,25% (p/p) en peso de biomasa seca. En este estudio, se logró un porcentaje de contenido lipídico de *Chlorella* en 23.81%, y *Ankistrodesmus* sp. en 27.81%% del cultivo en aguas residuales de la salida de desagüe de Moronacocha; y de *Chlorella* en 22.31%, y *Ankistrodesmus* sp. en 28.63%% del cultivo en aguas residuales de la salida de desagüe de Puerto el Huequito.

Es así que, el interés a nivel mundial en el cultivo de microalgas con fines energéticos, unido a la necesidad de disponer de tecnologías de tratamiento de aguas residuales medioambientalmente más sostenibles, ha hecho que los procesos de tratamiento de aguas residuales mediante microalgas sea una alternativa prometedora desde el punto de vista económico y ambiental frente a sus homólogos aerobios y anaerobios (10).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La tasa de crecimiento microalgal fue mayor en *Ankistrodesmus* sp. cultivada en las aguas residuales de la salida de desagüe de Moronacocha.
- Se logró la remoción del 100% de amonio con *Ankistrodesmus* sp. y *Chlorella* sp. cultivadas en agua residual de la salida de desagüe de Moronacocha; también se logró una remoción del 92% de CO₂ con *Chlorella* sp. cultivada en el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito.
- No existe una relación directa entre la tasa de crecimiento y el porcentaje de remoción de nutrientes.
- La mayor producción de biomasa se observó en *Chlorella* sp. cultivada con el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito y el mayor contenido de lípidos totales se dio en *Ankistrodesmus* sp. también cultivada con el agua residual de la salida de desagüe del Puerto el Huequito.

5.2. Recomendaciones

- Realizar el tratamiento con mayor número de repeticiones para poder obtener datos más específicos.
- Realizar un análisis más detallado en cuanto a los parámetros químicos, por lo que, la Universidad Científica del Perú debe continuar con la implementación de materiales y equipos de laboratorio para tener mayor disponibilidad de los mismos.
- Continuar con este tipo de investigaciones que resultan beneficiosas para identificar procesos que ayuden a mejorar la calidad de vida de la sociedad por medio de prácticas ambientalmente amigables.

CAPÍTULO V: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GARCÍA-GOZALBES, César Carlos, ARBIB, Zouhayr and PERALES-VARGAS-MACHUCA, José Antonio. Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y ciencias del agua*. 2015. Vol. 6, p. 49–68.
2. MARA, D.D. and PEARSON, H.W. *Artificial freshwater environments: waste stabilization ponds*. W. Schoenborn, 1986. Biotechnology.
3. DE-BASHAN, Luz E. and BASHAN, Yoav. Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects. *Bioresource Technology*. March 2010. Vol. 101, no. 6, p. 1611–1627.
4. PNUMA. *A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment*. [online]. Nairobi, 2016. ISBN 978-92-807-3555-0.
5. WWAP and UNESCO. *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2017: Aguas residuales: el recurso no explotado*. UNESCO Publishing, 2017. ISBN 978-92-3-300058-2.
6. MATEO-SAGASTA, Javier, RASCHID-SALLY, Liqa and THEBO, Anne. Global Wastewater and Sludge Production, Treatment and Use. In : DRECHSEL, Pay, QADIR, Manzoor and WICHELS, Dennis (eds.), *Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World* [online]. Dordrecht : Springer Netherlands, 2015. p. 15–38.
7. HERNÁNDEZ-SANCHO, Francesc, LAMIZANA-DIALLO, Birguy, MATEO SAGASTA, Javier and QADIR, Manzoor. *Economic Valuation of Wastewater: The cost of action and the cost of no action* [online]. UNEP, 2015. [Accessed 15 February 2019]. ISBN 978-92-807-3474-4.
8. LARIOS - MEOÑO, J. Fernando, GONZÁLEZ TARANCO, Carlos and MORALES OLIVARES, Yennyfer. Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *SABER Y HACER*. 7 October 2015. Vol. 02, no. 02, p. 21.
9. ARORA, Anju and SAXENA, Sudhir. *Cultivation of Azolla microphylla biomass on secondary-treated Delhi municipal effluents*. 2005.
10. BOLADO RODRÍGUEZ, Silvia, MARTÍN JUAREZ, Judit, LEBRERO FERNÁNDEZ, Raquel, PÉREZ ELVIRA, Sara Isabel, GARCIA, Dimas, MARIN, David, LORENZO HERNANDO, Ana, GARCÍA ENCINA, Pedro A. and MUÑOZ TORRE, Raúl. Tratamiento y valorización de aguas residuales mediante microalgas. 2016.
11. ADAME ARELLANO, Saul Alan. *Potencial de Biomasa de Microalgas por el Tratamiento de Agua Residual Doméstica*. Torreón, Coahuila, México : Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro,” 2018.

12. VAZQUEZ-DUHALT, Rafael and ARREDONDO-VEGA, Bertha O. Haloadaptation of the green alga *Botryococcus braunii* (race a). *Phytochemistry*. 1 January 1991. Vol. 30, no. 9, p. 2919–2925.
13. SHEEHAN, J., DUNAHAY, T., BENEMANN, J. and ROESSLER, P. NREL/TP-580-24190, 15003040: *Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae; Close-Out Report* [online]. 1998.
14. HUNTLEY, Mark E. and REDALJE, Donald G. *CO2 mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12. 2007.
15. MARGALEF, Ramón Margalef. *Distribución de los macrofitos de las aguas dulces y salobres del E. y NE de España y dependencia de la composición química del medio* [online]. Fundación Juan March, 1981.
16. OLGUÍN, Eugenia J. Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnology Advances*. 1 December 2003. Vol. 22, no. 1, p. 81–91.
17. MULBRY, Walter, KONDRAD, Shannon, PIZARRO, Carolina and KEBEDE-WESTHEAD, Elizabeth. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers. *Bioresource Technology*. 1 November 2008. Vol. 99, no. 17, p. 8137–8142.
18. MUÑOZ, Raul and GUIEYSSE, Benoit. Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*. 1 August 2006. Vol. 40, no. 15, p. 2799–2815.
19. LAVOIE, A and DE LA NOÛE, J. Hyperconcentrated cultures of *Scenedesmus obliquus*: A new approach for wastewater biological tertiary treatment? *Water Research*. 1 January 1985. Vol. 19, no. 11, p. 1437–1442.
20. TCHOBANOGLOUS, George, BURTON, Franklin Louis and EDDY, Metcalf &. *Wastewater engineering : treatment, disposal, and reuse* [online]. 3rd ed. / revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton. New York : McGraw-Hill, 1991.
21. JORGENSEN, T. C. and WEATHERLEY, L. R. Ammonia removal from wastewater by ion exchange in the presence of organic contaminants. *Water Research*. April 2003. Vol. 37, no. 8, p. 1723–1728.
22. LIM, Sing-Lai, CHU, Wan-Loy and PHANG, Siew-Moi. Use of *Chlorella vulgaris* for bioremediation of textile wastewater. *Bioresource Technology*. October 2010. Vol. 101, no. 19, p. 7314–7322.

23. AMOS RICHMOND, PH.D., QIANG HU, PH.D. and PROF. EMERITUS (eds.). *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. Segunda edición. 2013. ISBN 978-0-470-67389-8.
24. DIAZ CALAMPA, LILIA VANESSA and URCIA SABOYA,, MARGARITA ALHELI. *Aislamiento e identificación de Microalgas Oleaginosas en las Cuencas de los Ríos Amazonas, Itaya y Nanay, Loreto - 2013*. Investigación. IQUITOS - PERU : Universidad Científica del Perú - UCP, 2014.
25. COBOS RUIZ, Marianela, CASTRO GÓMEZ, Juan Carlos and CERDEIRA GUTIERREZ, Luis Alexander. Potencial biotecnológico para la producción sustentable de biodiesel de microalgas oleaginosas aisladas del Río Itaya, Loreto, Perú. *Ecología Aplicada*. July 2014. Vol. 13, no. 2, p. 169–175.
26. GOLTERMAN, H.L., CLYMO, R.S. and OHNSTAD, M.A.M. *Methods of Physical and Chemical Analysis of Fresh Waters*. Oxford : Blackwell Scientific Publications, 1978. ISBN 978-0-632-00459-1.
27. FATHI, Adel, AZOOZ, Mohamed and A. AL-FREDAN, Mohamed. *Phycoremediation and the potential of sustainable algal biofuel production using wastewater*. 2013.
28. FRAMPTON, Dion M. F., GURNEY, Robert H., DUNSTAN, Graeme A., CLEMENTSON, Lesley A., TOIFL, Melissa C., POLLARD, Chris B., BURN, Stewart, JAMESON, Ian D. and BLACKBURN, Susan I. Evaluation of growth, nutrient utilization and production of bioproducts by a wastewater-isolated microalga. *Bioresource Technology*. 1 February 2013. Vol. 130, p. 261–268.
29. YU, Xuya, ZHAO, Peng, HE, Cian, LI, Junjun, TANG, Xianhua, ZHOU, Junpei and HUANG, Zunxi. *Isolation of a novel strain of Monoraphidium sp and characterization of its potential application as biodiesel feedstock*. 2012.
30. JOHN J. *A self-sustainable remediation system for acidic mine voids*. In: *4th International conference of diffuse pollution*. Bangkok, Thailand, 2000.
31. RAWAT, I., RANJITH KUMAR, R., MUTANDA, T. and BUX, F. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*. October 2011. Vol. 88, no. 10, p. 3411–3424.
32. HERNANDEZ, Juan-Pablo, DE-BASHAN, Luz E. and BASHAN, Yoav. Starvation enhances phosphorus removal from wastewater by the microalga *Chlorella* spp. co-immobilized with *Azospirillum brasilense*. *Enzyme and Microbial Technology*. 3 January 2006. Vol. 38, no. 1, p. 190–198.

33. MALLICK, Nirupama. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: A review. *BioMetals*. 2002. Vol. 15, no. 4, p. 377–390.
34. ASLAN, Sebnem and KAPDAN, Ilgi Karapinar. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecological Engineering*. 1 November 2006. Vol. 28, no. 1, p. 64–70.
35. RAO, P., KUMAR, R. R., RAGHAVAN, B. G., SUBRAMANIAN, V. V. and SIVASUBRAMANIAN, V. Application of phycoremediation technology in the treatment of wastewater from a leather-processing chemical manufacturing facility. *Water SA* [online]. 1 January 2011. Vol. 37, no. 1.
36. OLIVER, R. and GANF, G. *The Ecology of Cyanobacteria, Texto original: Their Diversity in Time and Space* [online]. Springer Netherlands, 2000.
37. KONG, Qing-xue, LI, Ling, MARTINEZ, Blanca, CHEN, Paul and RUAN, Roger. Culture of microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in wastewater for biomass feedstock production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. January 2010. Vol. 160, no. 1, p. 9–18.
38. GANI, Paran, MOHAMED SUNAR, Norshuhaila, MATIAS PERALTA, Hazel Monica, ABDUL LATIFF, Ab Aziz, PARJO, Umi Kalthsom and AB. RAZAK, Abdul Rafiq. Phycoremediation of wastewaters and potential hydrocarbon from microalgae: a review. *Advances in Environmental Biology*. 2015. Vol. 9, p. 1–8.
39. PITTMAN, Jon K., DEAN, Andrew P. and OSUNDEKO, Olumayowa. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*. January 2011. Vol. 102, no. 1, p. 17–25.
40. CHINNASAMY, Senthil, BHATNAGAR, Ashish, HUNT, Ryan W. and DAS, K. C. Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresource Technology*. May 2010. Vol. 101, no. 9, p. 3097–3105.

CAPÍTULO VI: ANEXOS

Ficha de Registro de Recolección de Agua Residual

Fecha de Colecta:			
Hora de Colecta:			
N°	Lugar	Cantidad	Observaciones

Color del agua y aspecto

Ficha de Conteo:

FECHA

N°	<i>Chlorella sp.</i>			
	MC 1	MC 2	PH 1	PH2
1				
2				
3				
4				
5				
Total				
Promedio				
Concentración				
Tasa de crecimiento				

FECHA

N°		<i>Ankistrodesmus sp.</i>			
		MC 1	MC 2	PH 1	PH2
ARRIBA	1				
	2				
	3				
	4				
ABAJO	1				
	2				
	3				
	4				
Total					
Promedio					
Concentración					
Tasa de crecimiento					